

Université de Bourgogne – U.F.R. Sciences Humaines
Département de Psychologie – École Doctorale E2S
LEAD CNRS – UMR 5022

**Entraînement Auditif et Musical Chez l'Enfant Sourd Profond :
Effets sur la Perception Auditive et Effets de Transferts**

THÈSE

Présentée par **Françoise Rochette**

Sous la direction d'Emmanuel Bigand

En vue de l'obtention du grade de Docteur en Psychologie de l'Université de Bourgogne

26 Octobre 2012

© Françoise Rochette, 2012

Constitution du Jury

Séverine Samson, Pr. (Université de Lille 3, France), Présidente.

Barbara Tillmann, Pr. (Université de Lyon, France), Rapporteur.

Hervé Platel, Pr. (Université de Caen, France), Rapporteur.

Jacqueline Leybaert, Pr. (Université Libre de Bruxelles, Belgique), Examineur externe.

François Madurell, Pr. (Université Paris IV, France), Examineur externe.

Emmanuel Bigand, Pr. (Université de Bourgogne, France), Directeur de thèse.

Remerciements

Je suis arrivée au LEAD pour effectuer mon M2 recherche. Cette rencontre m'a apporté un enrichissement théorique et scientifique qui m'a permis de démarrer l'aventure de cette thèse. Je remercie tous les membres du LEAD. J'ai par-dessus tout développé une magnifique complicité amicale et scientifique avec Aline. Je lui adresse mes remerciements émus pour sa générosité et son écoute.

Je remercie toutes les équipes qui m'ont accueillie pour la passation des expériences.

Je remercie Monsieur LAMIREL, Directeur de l'INSHEA d'Auxerre, ainsi que son équipe.

Je remercie les membres de l'équipe d'ORL pédiatrique de l'hôpital de la Timone à Marseille pour leur participation et leur investissement dans la réalisation de l'expérience d'entraînement auditif. J'adresse des remerciements chaleureux à Stéphane ROMAN pour son accueil, sa disponibilité, les relectures des articles et pour avoir accepté d'être membre de mon Comité de Suivi de thèse. Je remercie aussi Catherine Liégeois-Chauvel.

Je remercie toute l'équipe du CEOP de Paris, tout particulièrement Sandrine PERRAUDEAU et Martial FRANZONI pour avoir réuni les meilleures conditions possibles pour les passations de mes nombreuses séances de testing.

Je remercie les enseignants et les directeurs des écoles qui m'ont ouvert les portes de leurs classes pour le recueil d'échantillons vocaux.

J'exprime ma gratitude aux enfants et à leur famille pour leur participation.

Je remercie mes collègues du cabinet d'orthophonie de leur soutien et pour avoir suppléé mes périodes d'absence, et tout particulièrement mon binôme Gaëlle. Merci aussi à Sébastien, mon informaticien préféré, pour ses réponses promptes et efficaces.

Je remercie mes amis et ma famille d'avoir accepté de sacrifier temporairement notre proximité et me permettre de réaliser cette thèse. Par ces mots, je remercie particulièrement mon amie Céline pour les délicieuses haltes lors de mes déplacements à Marseille et ses relectures assidues. J'adresse aussi toute ma tendresse à mes enfants, Anne-Sophie et Quentin, merci à vous deux d'avoir été mes piliers.

Enfin, Emmanuel, je te remercie de m'avoir fait confiance, d'avoir accepté la direction de ma thèse en sachant que je ne pourrais m'y consacrer qu'à temps partiel. Tu as nourri mes réflexions. A tes côtés j'ai évolué dans mes pratiques professionnelles. Je te remercie sincèrement pour tout ce que tu m'as apporté.

Sommaire

Remerciements	v
Résumé	xiii
Abstract.....	xv
PARTIE THÉORIQUE	1
Introduction.....	3
Chapitre 1 : Définir la surdité profonde congénitale et ses traitements	7
1. Anatomie des voies de l’audition.....	7
2. Physiologie de l’audition	8
3. Qu’est-ce que la surdité de perception ?	8
4. Les appareillages.....	9
4. 1. Prothèse auditive	9
4. 2. Implant cochléaire.....	10
5. Résumé.....	11
Chapitre 2 : Développement langagier chez l’enfant normo-entendant	13
1. Développement langagier chez l’enfant normo-entendant entre 0 et 18 mois.....	13
2. Expliquer le développement des compétences langagières	15
2. 1. Apprentissage statistique.....	15
2. 2. Rôle des interactions sociales	16
2. 3. Le modèle DIVA (Guenther, Ghosh, & Tourville, 2006)	17
3. Résumé.....	18
Chapitre 3 : Développement du langage, compétences linguistiques et cognitives des enfants sourds.....	21
1. Compétences langagières.....	21
2. Contrôle vocal	23
3. Autres troubles perceptifs	25
3. 1. Traitement de la prosodie par les enfants sourds porteurs d’implant cochléaire	25
3. 2. Reconnaissance des voix.....	26
3. 3. Perception de la musique	26
4. Les troubles cognitifs	28
4. 1. Contrôle cognitif et fonctions exécutives	28
4. 2. Le traitement séquentiel	30

5. Plasticité développementale.....	32
5. 1. Développement et maturation neuronale	32
5. 2. Spécialisations cérébrales fonctionnelles et plasticité cross-modale.....	33
6. Résumé.....	34
Chapitre 4 : Audition et plasticité cérébrale.....	37
1. Effets de la dé-afférentation auditive	37
2. Effets de la ré-afférentation auditive.....	38
2. 1. Données chez l'animal	38
2. 2. Effets de l'implant cochléaire chez l'adulte sourd post-lingual	39
2. 3. Effets de l'implant cochléaire chez l'enfant sourd prélingual	40
3. Effets de l'environnement enrichi, exemple des musiciens.....	41
3. 1. Modifications neuroanatomiques	41
3. 2. Compétences auditives dans le domaine musical	42
3. 3. Transfert vers le langage	43
3. 4. Autres compétences	45
3. 5. Études longitudinales	47
4. Comprendre les effets bénéfiques de la musique.....	47
5. Utilisation de la musique en thérapie du langage	48
6. Résumé.....	48
Chapitre 5 : Méthodes et programmes d'éducation auditive	51
1. Les méthodes d'éducation auditive.....	51
1. 1. La méthode Borel-Maisonny	51
1. 2. La Méthode verbo-tonale	53
2. Les aides visuelles.....	54
3. Les programmes d'éducation auditive	55
3. 1. Programme de rééducation des troubles du développement du langage	55
3. 2. Rééducation des troubles centraux de l'audition.....	57
3. 3. Programmes de stimulations des troubles perceptifs des sujets sourds.....	57
4. Résumé.....	60
Objectifs de la thèse et Hypothèses.....	61
1. Étude 1 : Évaluer les effets d'un programme d'entraînement auditif de courte durée le « Son en Mains ».....	63
2. Étude 2 : Évaluer les effets de la pratique musicale sur les compétences perceptives, phonétiques et le monitoring de la voix.....	63
3. Étude 3 : Évaluer les compétences de perception des émotions musicales et d'apprentissage implicite	64
4. Procédure générale.....	64
5. Plan de la partie expérimentale	65
6. Contribution méthodologique et théorique	65
PARTIE EXPÉRIMENTALE.....	67
Article 1 : Entraînement auditif et éducation auditive chez les enfants sourds	69

1. Introduction.....	69
2. Méthodologie	72
2. 1. Participants.....	72
2. 2. Matériel.....	73
2. 3. Procédure	74
2. 4. Plan d'expérience.....	74
3. Résultats.....	75
4. Discussion générale et conclusion	76
Article 2: Long-term effects of deaf children's auditory training	79
1. Introduction.....	79
2. Method	80
2. 1. Participants.....	80
2. 2. Material	80
2. 3. Procedure	80
2. 4. Experimental design.....	80
3. Results.....	81
4. Discussion	82
Article 3: Auditory training improves auditory performances in cochlear implanted children	83
1. Introduction.....	83
2. Method	85
2. 1. Participants.....	85
2. 2. Material and procedure	85
2. 3. Experimental design.....	86
3. Results.....	87
4. Discussion	90
5. Conclusion	92
Article 4: Evolution of deaf children's speech after auditory training	93
1. Introduction.....	93
2. Method	96
2. 1. Participants.....	96
2. 2. Material and Procedure	97
2. 3. Experimental Design.....	97
3. Results.....	98
4. Discussion	102
5. Conclusion	103
Article 5: Is music a relevant tool in deaf children's auditory training?	105
1. Introduction.....	105
2. Study 1	107
2. 1. Method.....	107
2. 2. Results.....	108

2. 3. Discussion	109
3. Study 2	109
3. 1. Method	110
3. 2. Results.....	110
3. 3. Discussion	111
4. General discussion	112
5. Conclusion	112
Article 6 : Reconnaissance des émotions musicales chez les enfants malentendants implantés et appareillés	115
1. Introduction.....	115
2. Méthodologie	117
2. 1. Participants.....	117
2. 2. Matériel.....	118
2. 3. Procédure	119
3. Résultats.....	120
4. Discussion	122
Article 7 : La surdité affecte-t-elle les capacités d'apprentissage implicite chez les enfants sourds profonds ?	125
1. Introduction.....	125
2. Méthodologie	128
2. 1. Participants.....	128
2. 2. Matériel.....	128
2. 3. Procédure	129
3. Résultats.....	130
4. Discussion	131
Article 8 : Valeurs de la fréquence fondamentale et des formants dans la production d'un [a] prolongé chez les enfants	133
1. Introduction.....	133
2. Méthodologie	135
2. 1. Participants.....	135
2. 2. Procédure	135
3. Résultats.....	135
4. Discussion	140
Article 9 : La musique comme outil de stimulation cognitive.....	141
1. Introduction.....	142
2. L'importante réactivité du cerveau humain à la musique	142
2. 1. Précocité du Traitement de la Musique dans le Développement.....	143
2. 2. Impact de la Musique sur la Physiologie de l'Enfant et de l'Adulte	144
2. 3. Musique et Plasticité Cérébrale.....	145
2. 4. Résumé	148
3. Musique et Compétences non Musicales	148
3. 1. Perception	149

3. 2. Motricité	150
3. 3. Langage.....	151
3. 4. Mémoire.....	152
3. 5. Effet général sur la cognition	153
3. 6. Résumé	154
4. L'Utilisation de la Musique comme Outil de Thérapie.....	154
4. 1. Remédiation des Troubles Auditifs	155
4. 2. Remédiation des Troubles Sensori-moteurs.....	155
4. 3. Remédiation des Troubles du Langage	156
4. 4. Remédiation des Troubles Mnésiques.....	157
4. 5. Autres Effets sur la Cognition	158
4. 6. Effets sur l'Humeur.....	158
4. 7. Effets sur la Sensation de Douleur et les fonctions végétatives	159
4. 8. Aspect Relationnel et Social	159
4. 9. Résumé	160
5. Conclusion Générale et Perspectives	161
6. Remerciements.....	163
DISCUSSION GÉNÉRALE.....	165
BIBLIOGRAPHIE.....	173
ANNEXES	209
Annexe1 : Test de discrimination phonétique.....	210
Annexe2 : Questionnaire.....	211
Annexe3: Test de dénomination.....	212

Résumé

Ce travail de thèse porte sur l'entraînement auditif chez des enfants sourds profonds congénitaux. Il a pour objectif d'évaluer non seulement les effets de l'entraînement auditif sur les performances auditives générales mais aussi les effets de transfert sur la perception langagière et la production de la parole. Une période prolongée de déprivation auditive entraîne des difficultés massives de réception et de production du langage, des difficultés cognitives et perturbe la maturation des voies auditives centrales qui limitent les effets de la réhabilitation de la transmission sonore (implants ou prothèses auditives). Il est donc indispensable d'apprendre aux enfants l'acte d'écouter et de développer leur acuité auditive. La première étude de ce travail évalue la méthode d'entraînement auditif le « Son en Mains », un programme expérimental ludique qui permet la stimulation des opérations auditives générales, telles que l'identification, la discrimination, l'analyse de scènes auditives et la mémoire auditive. L'entraînement se déroule sur une période de 16 semaines à raison d'une séance hebdomadaire. Les résultats sont présentés et discutés dans les quatre premiers articles de la partie expérimentale. Ils montrent que le programme d'entraînement « Son en Mains » permet aux enfants sourds profonds une amélioration de leurs performances auditives mais surtout des effets de transfert vers les tâches non entraînées (discrimination phonétique et production de la parole). Les études 2 et 3 de cette thèse s'intéressent aux effets de l'apprentissage musical chez des enfants sourds profonds congénitaux. Ces études sont basées sur les observations effectuées chez les enfants normo-entendants qui montrent que l'apprentissage de la musique induit non seulement un traitement auditif plus fin mais aussi des effets positifs sur la cognition. Dans l'étude 2, des enfants sourds suivant des leçons de musique depuis 4 ans en moyenne montrent de meilleures performances en discrimination phonétique que les enfants sourds non musiciens issus du même établissement spécialisé. Ainsi, les scores des enfants musiciens semblent comparables à ceux obtenus avec le programme d'entraînement « Son en Mains » chez des enfants non musiciens (article 5). Enfin, la troisième étude de cette thèse explore les effets de leçons musicales sur la perception des émotions musicales et sur les capacités d'apprentissage implicite. Les résultats montrent que les enfants sourds musiciens présentent plus de difficultés que les enfants entendants non musiciens pour identifier les différentes émotions musicales (article 6). En revanche leurs capacités d'apprentissage implicite sont équivalentes (article 7). Les articles 8 et 9 représentent notre contribution méthodologique et théorique. En discussion générale, nous débattons des implications de ces résultats dans la prise en charge des enfants sourds profonds.

Mots-clés : Enfants sourds profonds ; Entraînement auditif ; Programme d'entraînement ; Musique

Abstract

This thesis focuses on the auditory training and auditory skill development of congenitally profoundly deaf children. It aims to evaluate, not only the effects of auditory training/auditory skill development on general auditory performances, but also the transfer effects on speech perception and development. An extended period of auditory deprivation leads to major difficulties in reception and speech production, cognitive difficulties, and also disrupts the maturation of central auditory pathways which limit the effects of hearing loss treatment in restoring sound transmission (cochlear implants or hearing aids). It is therefore necessary to teach children how to actively listen and to develop their auditory acuity. The first study of this thesis evaluates the auditory training/auditory skill development method entitled “Sound in Hand”, a recreational experimental program that allows stimulation of the general auditory processing skills, such as identification, discrimination, auditory scene analysis and auditory memory. The training program takes place over 16 weeks, on a weekly basis. The results are presented and discussed in the first four articles of the experimental section. They show that the training program “Sounds in Hand” enables profoundly deaf children to improve their auditory performances, in particular, the transfer effects to non-trained tasks (phonetic discrimination and speech development). Studies 2 and 3 of this thesis focus on the effects of musical training in congenitally profoundly deaf children. These studies are based on observations made in children with normal hearing which demonstrate that musical training not only result in finer auditory processing skills, but also has positive effects on cognition. In study 2, deaf children who have been taking music lessons for approximately four years, show better performances in phonetic discrimination than non-musician deaf children from the same special school. Thus, the scores of musician children seem comparable to those obtained with the “Sounds in Hand” training program in non-musician children (article 5). Finally, the third study of this thesis explores the effects of musical training on the perception of musical emotions and on implicit learning abilities. The results show that deaf musician children have more difficulties than non-musicians with normal hearing in identifying the different musical emotions (article 6). However, their implicit learning abilities are equivalent (article 7). Articles 8 and 9 represent a methodological and theoretical contribution. In the general discussion, we consider the implications of these results on therapies in profoundly deaf children.

English title: Auditory Training and Lessons of Music in Deaf Children: Effects of transfer

Keywords: Profoundly deaf children; Auditory training; Training Program; Music

PARTIE THÉORIQUE

Introduction

La prévalence de la surdité permanente bilatérale (perte auditive supérieure à 40 dB sur la meilleure oreille) a été estimée en France à une naissance sur 1000 (Rapport HAS, 2007). Un quart de ces enfants présente une surdité sévère ou profonde, l'origine génétique est mise en évidence chez trois quarts d'entre eux. Cette déficience sensorielle entraîne un retard de l'acquisition et du développement du langage, affecte le développement social et affectif et influence négativement l'acquisition des connaissances puis la carrière professionnelle (National Institutes of Health, 1993). Après un diagnostic porté à un âge moyen compris entre 12,5 et 36 mois, 16 mois en moyenne (Association RAMSES) (<http://ramses.asso.fr>), la prise en charge thérapeutique des enfants sourds sévères et profonds prélinguaux repose sur 2 axes. Le premier est médical : les médecins ORL et/ou audioprothésistes assurent la réhabilitation de la transmission des sons (prothèses auditives et/ou implants cochléaires). Le second concerne la prise en charge éducative et rééducative. Le coût d'une surdité sévère ou profonde congénitale a été estimé aux Etats-Unis à 1 020 000\$, dont la moitié pour l'éducation spéciale, 42% pour la perte de la productivité et seulement 7% pour la prise en charge médicale et audiolinguistique. Un travailleur sourd profond perçoit entre 70% et 80% du salaire moyen d'un entendant (Mohr et al., 2000).

Face à ce problème de santé publique, différents champs de recherche travaillent de façon complémentaire, telle la génétique, la physiologie auditive, l'audiologie, la biophysique sensorielle, la pédiatrie, la psychologie cognitive et du développement, les neurosciences. Chez l'animal, l'emploi de cellules souches embryonnaires a apporté des premiers résultats prometteurs (Hu, Ulfendahl, & Olivius, 2005a) de même que le transfert de gènes dans l'oreille interne a permis la régénération de cellules sensorielles correctement situées et fonctionnelles (Izumikawa et al., 2005). L'analyse des gènes exprimés au sein de la cochlée permet aujourd'hui d'analyser la physiopathologie des diverses formes génétiques de la surdité à l'échelle moléculaire. Compte-tenu de la prévalence de l'origine génétique des surdités prélinguales, des recherches de traitements nouveaux visant à limiter la progression de certaines formes génétiques de surdité (voire à empêcher leur apparition) sont en cours sur l'animal.

La meilleure compréhension des mécanismes de la physiologie auditive, de la biophysique sensorielle et de l'audiologie permet d'envisager le développement d'outils d'exploration de la fonction auditive de plus en plus efficaces et adaptés à l'âge des sujets, ainsi qu'un diagnostic plus précoce. Ainsi, mieux comprendre les défauts des appareillages actuellement proposés et développer des modes de transmission sonore plus conformes à la physiologie de l'oreille (McDermott, 2004) permettront à la fois la réduction des difficultés perceptives, comme l'écoute dans le bruit, et proposer des expériences auditives plus riches (par exemple la musique).

En plus des efforts portant sur la prévention de la surdité et la réduction des symptômes, un aspect important de la prise en charge est l'éducation, la stimulation de la fonction auditive par un entraînement adapté. La contribution respective de la psychologie cognitive, et particulièrement de la psychologie de l'audition, la psychologie du développement et des neurosciences permet de mieux cerner les effets fonctionnels de la déprivation sensorielle, les particularités d'apprentissage des enfants sourds et de proposer des

stratégies d'intervention visant non pas à combler les déficits à tout prix mais à optimiser le potentiel des enfants.

L'objectif de ce travail de thèse est d'étudier si et comment des moyens augmentatifs et non invasifs de stimulation de la fonction auditive, complémentaires aux méthodes rééducatives employées en France, peuvent améliorer l'utilisation de l'audition mais aussi les capacités d'apprentissage et la production de la parole chez des enfants présentant une surdité sévère et/ou profonde prélinguale, implantés ou porteurs de prothèses auditives. Cette recherche repose sur deux grands axes. Tout d'abord, nous proposons d'examiner si un programme d'entraînement auditif de courte durée que nous avons élaboré, le « Son en Mains », permet de développer chez ces enfants des stratégies générales d'écoute permettant d'optimiser la capacité auditive avec un transfert des bénéfices vers des tâches auditives non entraînées et d'améliorer la production de la parole. Dans le second axe de ce travail, nous évaluons les répercussions de cours de musique sur les performances auditives générales et leurs effets sur la cognition, en particulier sur les mécanismes d'apprentissage.

Nous présenterons dans le premier chapitre ce qu'est la surdité ainsi que ses moyens de traitement médicaux et leurs limites.

Les enfants qui ne reçoivent pas de correction auditive avant l'âge de 2 ans, accèdent généralement au langage via la modalité visuelle (langue des signes par exemple). Or la maturation du cerveau s'effectue par des étapes définies comme périodes dites critiques (sensibles) qui représentent une fenêtre temporelle au cours de laquelle les possibilités d'acquisition d'une compétence sont maximales et à l'issue de laquelle le cerveau prend une forme stable et moins sujette à la plasticité. Chez l'enfant, l'acquisition du langage vers l'âge de 2 ans est l'une de ces périodes critiques. Les modalités par lesquelles les représentations conceptuelles sont acquises à cet âge déterminent leur mode d'entrée dans le langage. Lorsque l'élaboration des représentations est construite à partir des 5 sens, chaque modalité constituera ensuite un moyen d'accès aux représentations correspondantes dans les autres modalités, permettant ainsi un traitement et une manipulation mentale rapide des concepts. Le deuxième chapitre présente les acquisitions réalisées par les enfants normo-entendants ainsi que les modèles théoriques expliquant ces acquisitions.

Si la modalité auditive est absente, les territoires associatifs qu'elle occupe normalement sont récupérés (par une autre modalité sensorielle ou par des processus multimodaux). Les territoires dé-afférentés perdent ainsi leur nature unimodale indispensable au traitement approfondi de l'information acoustique. Si des connexions sont rétablies tardivement entre les territoires auditifs primaires et les territoires associatifs, les étapes spécifiquement auditives qui permettent aux stimuli acoustiques de recevoir le niveau de traitement nécessaire à leur décodage seront manquantes. La surdité impacte donc à la fois les processus de perception auditive et les apprentissages qui en découlent. Elle affecterait également certains mécanismes d'apprentissage fondamentaux. Les conséquences de la surdité profonde prélinguale sont présentées dans le troisième chapitre.

Parallèlement, au cours de ces deux dernières décennies, des travaux en neurosciences ont permis des avancées remarquables dans la compréhension des mécanismes d'adaptation de notre système cérébral aux spécificités de notre environnement, en particulier les effets de plasticité observés dans un environnement appauvri, comme la déprivation sensorielle ou à l'inverse, dans un environnement enrichi. Les personnes fortement stimulées (les musiciens) développent des stratégies d'écoute à la fois dans le domaine entraîné (la musique) mais également dans des domaines connexes qui mettent en jeu les mêmes structures cérébrales. Des effets bénéfiques de la musique ont également été constatés dans le développement d'habiletés non musicales dès quelques mois d'entraînement. Le quatrième chapitre rend compte de ce champ de recherche.

La nécessité d'une éducation auditive soutenue chez les enfants sourds est un concept déjà ancien et a donné lieu à la naissance de deux méthodes toujours utilisées en France. L'efficacité relative chez certains enfants de l'input auditif combiné à la lecture labiale a permis la diffusion de moyens visuels complémentaires de la perception de la parole. Par ailleurs, par le croisement des connaissances issues des champs de recherche précités et d'un souci d'efficacité plus grande, de nouveaux outils de stimulation auditive ont été créés et testés auprès de diverses populations présentant des troubles du traitement auditif. Leur conception repose principalement sur deux approches: l'une est basée sur les propriétés acoustiques des stimuli acoustiques utilisés ayant pour objectif de développer le traitement auditif ascendant. L'autre privilégie le développement de la compréhension (écoute dans le bruit) ainsi que l'attention et vise l'acquisition de meilleurs mécanismes top-down. Ces interventions sont développées dans le cinquième chapitre.

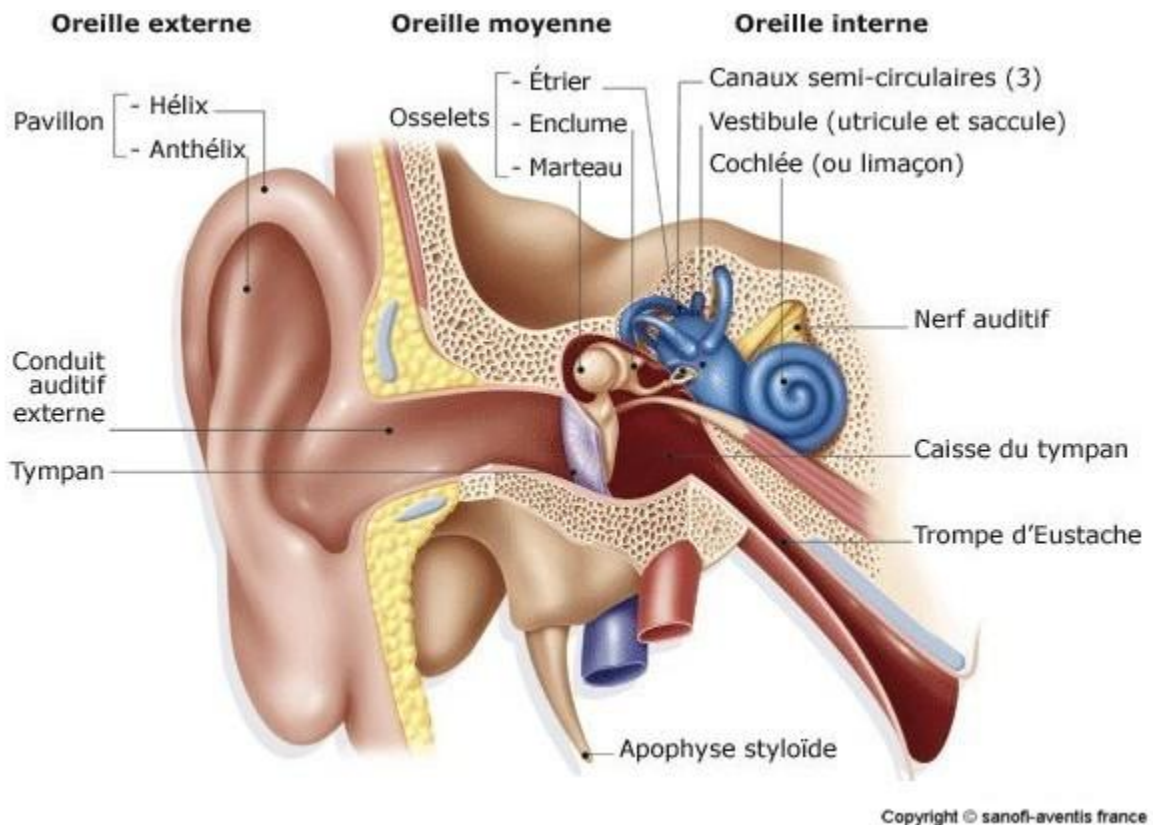
Nous terminerons cette partie théorique en exposant les objectifs spécifiques des études menées dans ce travail de thèse. Les résultats seront ensuite présentés sous forme d'articles dans la partie expérimentale. La première étude (articles 1 à 4), traite des effets du programme d'entraînement le « Son en Mains » sur les tâches entraînées ainsi que des effets de transfert observés vers une tâche perceptive non entraînée, la perception phonétique ainsi que sur la production de la parole et le monitoring de la voix. La seconde étude (article 5) évalue les effets de la pratique musicale sur les compétences perceptives, phonétiques et le monitoring de la voix. La troisième étude évalue les effets de l'entraînement musical sur leurs capacités de perception des émotions musicales (article 6) et d'apprentissage implicite (article 7). Les 2 derniers articles représentent une contribution théorique et scientifique, une base de données de différentes valeurs acoustiques de la voyelle /a/ chez les enfants de 4 à 11 ans (article 8) et une revue de littérature traitant de la musique comme outil de stimulation cognitive (article 9).

Chapitre 1 : Définir la surdité profonde congénitale et ses traitements

1. Anatomie des voies de l'audition

Les organes de l'audition sont constitués de l'oreille et de ses connexions centrales. Pour des raisons descriptives, l'oreille est divisée en trois parties: oreille externe, moyenne et interne (voir Figure 1 : anatomie de l'appareil auditif). Cette division est essentiellement anatomique. Au niveau fonctionnel, l'oreille externe et moyenne forment l'appareil auditif de transmission du phénomène vibratoire sonore. La transformation de l'énergie vibratoire en impulsions nerveuses (transduction) est effectuée dans l'oreille interne.

Figure1: anatomie de l'appareil auditif



2. Physiologie de l'audition

La sensation auditive se réalise lorsqu'un stimulus (vibration acoustique) parvient à l'organe sensoriel récepteur (la cochlée) situé dans la profondeur de l'os temporal, doté d'une fonction d'analyse. Cette analyse est effectuée grâce à la membrane basilaire, enroulée à l'intérieur de la cochlée, qui a la propriété de vibrer en des points précis correspondant à la fréquence du stimulus (codage spatial). La membrane basilaire est équipée en sa surface de cellules spécialisées (cellules ciliées internes) qui permettent la transformation de l'énergie mécanique en influx nerveux. Des processus électrochimiques vont permettre la génération de courants électriques qui stimulent les fibres du nerf auditif. Ces courants prennent la forme de potentiels d'action (PA) émis en séquences particulières pour les codages de fréquence et d'intensité.

Pour le codage de la fréquence du son, les PA sont synchronisés avec la phase du stimulus (principe de périodicité). Ce principe est respecté jusqu'à 4000 Hz. Pour les fréquences plus aigües, la sélectivité tonale des fibres du nerf auditif est requise (codage spatial). Le mode de décharge du nerf auditif consiste en une brusque augmentation du nombre de PA en début du stimulus, puis diminue progressivement jusqu'à atteinte d'une valeur constante (plateau) tant que la stimulation acoustique est maintenue. La diminution du nombre de décharge correspond au phénomène d'adaptation, et son origine est située principalement au niveau des synapses entre les cellules ciliées internes et les afférences dendritiques du nerf auditif. Pour le codage de l'intensité d'un son, le nombre de PA est proportionnel au niveau sonore jusqu'à une certaine intensité à partir de laquelle le taux de décharge est saturé et résulte de l'activité d'une population de fibres.

Une fois ce premier codage effectué, le pattern d'excitation neuronal correspondant à la nature du stimulus est transmis au noyau cochléaire, premier relais central des voies auditives. Ce noyau comprend plusieurs types cellulaires qui vont permettre une grande variété de réponses, transmises à travers différents relais (complexe de l'olive supérieure, noyau du lemnisque latéral, colliculi inférieur et supérieur, thalamus) au cortex auditif.

3. Qu'est-ce que la surdité de perception ?

La surdité est à l'heure actuelle définie selon trois critères : (1) le siège de la perte auditive (oreille moyenne ou interne et/ou nerf auditif) déterminant l'origine transmissionnelle ou perceptive de la surdité ; (2) le degré de sévérité de la perte auditive qui permet de distinguer les surdités légères (seuil auditif jusqu'à 40 dB), des surdités moyennes (seuil compris entre 40 et 70 dB), les surdités sévères (seuil compris entre 70 et 90 dB) et les surdités profondes (seuil au-delà de 90 dB) selon la recommandation du BIAP 02/1 bis; (3) le moment de survenue de la surdité : avant l'apparition du langage (surdité pré-linguale) ou après l'installation du langage (surdité post-linguale).

Les surdités de perception se traduisent par une atteinte uni ou bilatérale de l'oreille interne, des voies ou des centres nerveux auditifs et s'opposent aux surdités de transmission qui correspondent, elles, à une atteinte de l'oreille externe ou de l'oreille moyenne. La surdité est dite congénitale si le déficit auditif a débuté au cours de la période périnatale. Les surdités génétiques sont dans un tiers des cas « syndromiques ». Elles s'intègrent dans un syndrome génétique avec atteinte de plusieurs organes. Certaines surdités génétiques sont présentes dès la naissance et sont souvent bilatérales, sévères ou profondes. Dans deux tiers des cas, elles sont non syndromiques ou isolées. Elles affectent le développement et/ou la survie des cellules ciliées et/ou d'autres structures de l'organe de Corti. Les surdités acquises résultent de

souffrance périnatale de l'oreille interne et sont essentiellement causées par des infections contractées pendant la grossesse (rubéole, cytomégalovirus, toxoplasmose).

L'audiométrie permet d'affirmer le déficit auditif, le quantifier, localiser le site responsable du déficit et enfin analyser l'étiologie du déficit. La surdité de perception du nourrisson et du très jeune enfant est mise en évidence par des examens particuliers, les potentiels évoqués auditifs et les otoémissions acoustiques.

Les potentiels évoqués auditifs (PEA) classiques représentent la réponse du nerf cochléaire, du tronc cérébral et du mésencéphale à des clics ou à des bouffées tonales (*tone bursts*) présentés à l'oreille externe. Ces réponses sont enregistrées par des électrodes à la surface de la peau. La principale composante, connue sous le nom d'onde V, peut être recueillie à des niveaux de stimulation faibles chez le sujet normo-entendant. Chez l'enfant dont le développement neurologique est normal, le seuil de détection de l'onde V est bien corrélé à la sensibilité auditive sur la zone de fréquence 1,5-4,0 kHz (Smith, Bale, & White, 2005).

Les émissions acoustiques sont des sons émis par la cochlée vers le monde extérieur. Les otoémissions acoustiques provoquées (OEP) sont des sons émis en réponse à une stimulation auditive, le clic est typiquement utilisé. La genèse des OEP repose sur le fonctionnement correct des cellules ciliées externes et de l'organe de Corti. Pour explorer la cochlée, les OEP sont recueillies au niveau de l'oreille externe par une sonde acoustique miniaturisée.

La surdité profonde correspond à une perte moyenne supérieure à 90 dB et plus, ce qui implique que la perception de la parole est impossible.

Actuellement, le seul traitement médical de ces surdités de perception repose sur la suppléance de la perte auditive par deux techniques que sont la prothèse auditive et l'implant cochléaire. Le paragraphe suivant présente ces deux techniques ainsi que leurs limites.

4. Les appareillages

4. 1. Prothèse auditive

La prothèse auditive est un principe permettant d'amplifier le son et est composée de 4 éléments principaux : (1) un microphone recueille les sons de l'environnement et les transforme en impulsions électriques ; (2) un amplificateur d'entrée qui renforce l'énergie électrique ; (3) un écouteur qui restitue l'énergie électrique en énergie acoustique dans l'oreille ; (4) une source d'énergie (pile). Deux types de prothèses sont actuellement disponibles sur le marché français, la prothèse analogique (qui tend à disparaître) et la prothèse numérique qui est de loin la plus répandue et la plus performante. Le signal analogique capté par le microphone est converti en un signal numérique par le microprocesseur : la numérisation du signal repose sur deux activités parallèles, l'échantillonnage et la quantification. L'échantillonnage consiste à prélever des échantillons du signal à des moments séparés également dans le temps. La quantification permet d'assigner des valeurs mathématiques repérables à chaque onde sinusoïdale échantillonnée. Ces valeurs mathématiques sont transcrites selon un mode binaire (0 ou 1). Le signal numérique binaire est ensuite envoyé à un microprocesseur qui dicte à la prothèse numérique, par l'intermédiaire d'algorithmes, la façon de traiter le signal. Ce dernier est ensuite transformé par le convertisseur numérique analogique en un son que l'oreille peut traiter. La fidélité du signal numérique dépend essentiellement de la fréquence d'échantillonnage. Ce type de prothèse, divisant le son en bandes de fréquences, offre la possibilité de pouvoir intervenir sur chaque fréquence séparément, en modulant le degré de compression ou d'amplification pour chaque canal fréquentiel. Les signaux de chaque canal sont ensuite

recombinés pour former un son cohérent audible par le malentendant. Un algorithme de réduction de bruit permet de privilégier les fréquences de la parole (amélioration du ratio signal/bruit). Les prothèses numériques sont dotées d'un système d'amplification (expansion) qui augmente peu les sons de faible intensité (bruits ambiants) et davantage ceux d'intensité moyenne (parole). La reconnaissance de la parole dans le bruit est assurée par l'omni-directionnalité des microphones (l'un dirigé vers l'avant, et l'autre vers l'arrière). En fonction de la direction du son, celui-ci sera soit amplifié, soit supprimé. Les prothèses multiprogrammables (prothèse à mémoire multiple) permettent à l'utilisateur de choisir parmi tous les programmes de sa prothèse celui qui convient le mieux à l'environnement dans lequel il se trouve. Depuis peu, une option de changement automatique du programme est disponible. Enfin, l'appareillage stéréophonique permet une meilleure localisation du son, un plus grand confort d'écoute, une plus grande capacité à distinguer les mots dans un environnement bruyant et une meilleure qualité sonore (Mayer, 2008)

La prothèse est censée amplifier sélectivement certaines fréquences utiles pour la compréhension de la parole. En cas d'atteinte neurosensorielle, l'atteinte des cellules ciliées externes entraîne une perte de sélectivité fréquentielle, d'où des difficultés majeures pour distinguer des sons de fréquences proches, et par exemple la parole du bruit. L'autre inconvénient réside dans le fait que même si l'audition du patient est abaissée, son seuil d'inconfort reste le même (phénomène de recrutement) d'où la nécessité d'amplifier différemment les différentes fréquences.

4. 2. Implant cochléaire

Le principe d'un implant cochléaire est basé sur le contournement de différentes structures normalement impliquées dans l'audition telles que l'oreille externe, l'oreille moyenne et une partie de l'oreille interne comprenant les cellules ciliées internes. Cet ensemble est remplacé par 1) un microphone placé à hauteur de l'oreille externe qui a pour fonction de capter les signaux issus de l'environnement sonore et de les transformer en signal électrique, 2) un processeur responsable de la mise en forme du signal (filtrage, intensité) et de la production d'un code en temps réel sous la forme d'impulsions électriques, 3) une ou plusieurs électrodes insérées dans le premier tour cochléaire de manière à être le plus proche possible des fibres afférentes du nerf auditif et de leurs corps cellulaires (ganglion spiral). Le principal défi consiste bien évidemment à produire un code électrique capable de stimuler les neurones auditifs de façon efficace pour générer une information qui sera interprétée comme un son au niveau du cerveau. A l'heure actuelle, ce type de prothèse parvient plus ou moins à restituer l'amplitude et la fréquence d'une stimulation acoustique. La stratégie actuellement utilisée est basée sur le codage spatial des fréquences afin de stimuler différentes fibres du nerf auditif à différents endroits de la cochlée. Pour cela un groupe d'électrodes (de 4 à 22 dans les dispositifs actuels) sont implantées le long du canal cochléaire dans une configuration monopolaire (électrode de référence à l'extérieur de la cochlée) ou bipolaire (électrodes actives et de référence proches l'une de l'autre) et reçoivent une stimulation en fonction de la fréquence du signal : les électrodes situées à la base de la cochlée sont stimulées avec les signaux de haute fréquence tandis que celles localisées à l'apex sont stimulées par les signaux de basse fréquence.

L'implant cochléaire comporte certaines limites : l'enveloppe de la parole est respectée (modulations d'amplitudes lentes) mais les structures temporelles fines ne sont pas codées par les implants, car les fibres nerveuses ne peuvent être stimulées au-delà d'une cadence de 300 Hz, donc pas d'idée précise de la hauteur de la fondamentale si ce n'est jusqu'à 300 Hz. L'insertion des électrodes n'est pas assez profonde pour respecter la carte tonotopique

naturelle et la carte proposée est décalée vers le haut. Le codage de la hauteur des sons reste problématique pour ces deux raisons, les centres auditifs ne recevant pas les informations requises ou les recevant de manière incohérente. Il en résulte certaines performances perceptives altérées, en particulier dans le bruit et pour la reconnaissance des voix et de la musique. Une amélioration notable est apportée par le port d'une prothèse contralatérale à l'implant.

Une des conséquences majeures de la surdité affecte le développement du langage. L'âge moyen du diagnostic de surdité profonde est porté autour de 16 mois de vie en moyenne. Au cours de cette période, sous les effets de prédispositions et de l'exposition à un environnement sonore (et linguistique) surtout à des moments dits critiques, c'est-à-dire à des périodes de développement neurocognitif optimales, de nombreux apprentissages auditifs et langagiers ont été effectués par leurs pairs entendants. De plus, les enfants entendants, sous l'effet du contrôle auditif, exercent et affinent leurs productions vocales et articulatoires. Les enfants sourds démarrent leur entrée dans le monde sonore et de la communication avec une différence chronologique au cours de laquelle leur système nerveux central ainsi que leur système cognitif se sont développés en s'adaptant à la déprivation de cette modalité sensorielle. La perte auditive réduit les possibilités de contrôle de l'enfant sur ses propres émissions vocales (développement perturbé de la boucle audio-phonatoire), impliquant une diminution de l'intelligibilité de la parole. Ces facteurs expliquent le retard et les déficits du développement du langage oral (en réception et en production) chez les enfants sourds profonds.

5. Résumé

La surdité de perception correspond à une atteinte de l'oreille interne et est responsable d'une perte auditive supérieure à 90 dB. Le seul traitement de la surdité actuellement disponible repose sur la réhabilitation de la transmission de l'information sonore par deux moyens qui sont la prothèse auditive et l'implant cochléaire. Dans les deux cas, le signal acoustique perçu est différent et appauvri comparativement au signal naturel, ce qui engendre des difficultés spécifiques pour percevoir certains traits acoustiques. Ce sont donc des informations sonores parcellaires et tronquées que l'enfant doit traiter.

D'autre part, ces informations parviennent à un moment du développement de l'enfant avant lequel de nombreux apprentissages sont normalement réalisés. En référence au développement de l'enfant entendant, le chapitre suivant présentera les étapes et les modèles du développement langagier entre 0 et 24 mois.

Chapitre 2 : Développement langagier chez l'enfant normo-entendant

La perte de l'audition affecte qualitativement et quantitativement les informations qui parviennent à l'enfant. Nous avons vu que l'âge moyen du diagnostic se situe autour de 16 mois, et de surcroît que l'âge du diagnostic est corrélé négativement avec le degré de surdité. Cependant, au cours de cette période, des aptitudes préexistantes sont normalement stimulées et se développent sous l'action de cette stimulation auditive. La première partie de chapitre retrace les étapes du développement linguistique de l'enfant entendant. Nous aborderons en seconde section les modèles théoriques qui soutiennent le développement normal et permettent de comprendre les effets de la déprivation sensorielle auditive.

1. Développement langagier chez l'enfant normo-entendant entre 0 et 18 mois

La cochlée est fonctionnelle à partir de la vingt-cinquième semaine de grossesse. Les fœtus semblent pré-équipés pour produire différentes étapes de traitement auditif qui vont être déclenchés sous l'effet de l'environnement sonore. De nombreuses études visant à caractériser les apprentissages dans des domaines spécifiques démontrent que les principales opérations du traitement auditif sont déjà disponibles. McAdams & Bigand (1994) déterminent plusieurs étapes de traitement cognitif depuis la transduction. Des processus de groupement auditif effectuent la fusion des éléments sonores simultanés pour créer événements auditifs. Les événements successifs sont organisés en flux auditifs. Les propriétés perceptives sont ensuite extraites pour permettre une perception globale de la structure sonore et seront ensuite interprétées en fonction des structures de connaissances abstraites, permettant l'identification et la signification en fonction des expériences antérieures ainsi que l'élaboration ou l'activation d'une représentation mentale.

Les nourrissons sont équipés de dispositifs sophistiqués de traitement reposant sur des mécanismes de type analytique. Dès quelques jours de vie, ils présentent des compétences pour discriminer les variations de durée très brèves, de l'ordre de 15 à 20 ms (durée des consonnes sourdes) dans le signal acoustique qui leur parvient. Ils détectent ainsi des différences phonétiques non seulement de leur langue maternelle mais également dans les langues auxquelles ils n'ont jamais été exposés (De Boysson-Bardies, 2005). Par exemple, les bébés japonais sont capables de discriminer les phonèmes [r] et [l] alors que cette différence n'est pas pertinente dans la langue japonaise.

À l'âge de 2 mois, les enfants semblent utiliser les indices prosodiques et détectent mieux la modification d'un phonème si le mot est contenu dans une phrase que dans une liste (Mandel, Jusczyk, & Kemler-Nelson, 1994). Autour de 6 mois, les enfants commencent à démontrer une sensibilité particulière pour les sons de la langue à laquelle ils sont exposés. Ils démontrent une sensibilité accrue à l'espace vocalique des voyelles de leur langue (Kuhl, Williams, Lacerda, Stevens, & Lindblom, 1992). Un peu plus tardivement (8-10 mois), leur capacité à discriminer tous les contrastes consonantiques diminue. Par exemple, la

compétence précoce des bébés japonais pour discriminer [r] et [l] s'estompe progressivement, tandis qu'elle s'affine chez des bébés américains du même âge (Kuhl, 2006), suggérant une période sensible (critique) pour les apprentissages phonétiques. A l'âge de 8 mois, ils sont capables de distinctions phonétiques fines à l'intérieur de mots (Jusczyk & Aslin, 1995). Pour mettre ces compétences en évidence, les auteurs ont familiarisé un groupe d'enfants avec le mot « dog » et un groupe d'enfant avec le mot « bog » puis les ont soumis à 6 passages contenant ou non le mot « dog ». Seuls les enfants familiarisés avec ce mot ont manifesté une préférence pour les passages contenant le mot « dog ». Autour de 9 mois, les enfants présentent une sensibilité aux règles phonotactiques de la langue à laquelle ils sont exposés et préfèrent écouter des listes de mots correspondant aux règles phonotactiques de leur langue plutôt qu'une langue qui viole ces règles (Jusczyk, Friederici, Wessels, Svenkérud, & Jusczyk, 1993). Dans une étude longitudinale récente, Kuhl et collaborateurs (Kuhl & Rivera-Gaxiola, 2008), utilisant des mesures comportementales et des mesures électro-physiologiques (MMN) ont montré une corrélation positive entre l'aptitude à discriminer les sons de la langue natale vs ceux d'autres langues et les performances langagières à 14 – 18 – 24 et 30 mois. Enfin, partir de 19-23 mois, les représentations phonétiques des mots sont suffisamment stables pour que des modifications phonétiques subtiles entravent leur compréhension (Swingley & Aslin, 2000), ce, indépendamment de la taille de leur vocabulaire actif. L'enfant vient donc au monde avec des capacités à traiter les caractéristiques des sons de la parole mais ce traitement se poursuit par la suite à un niveau plus élevé d'organisation de la parole et du langage.

La sensibilité des nourrissons aux signaux acoustiques de la parole ne concerne pas seulement les caractéristiques phonologiques. Dès 4 mois et demi, ils manifestent la reconnaissance de leur prénom parmi 4 qui leur sont proposés (Mandel, Jusczyk, & Pisoni, 1995). Cette compétence a pu se développer du fait que ce signal acoustique a de nombreuses fois été écouté de façon isolée. En revanche, dans la chaîne parlée, les bébés de 5 mois démontrent des préférences pour des histoires lues avec des pauses situées aux frontières des propositions, si l'histoire est lue avec les caractéristiques intonatives du *motherese*, y compris à l'écoute de langues étrangères. A 9 mois, la préférence est marquée pour les textes présentant des pauses situées aux frontières entre sujet et prédicat (De Boysson-Bardies, 2005). Les bébés présentent donc une sensibilité aux marques prosodiques de la segmentation, comme les variations temporelles de durée des segments, l'allongement des syllabes finales et les pauses, ainsi que les variations de hauteur qui marquent les frontières entre les unités grammaticales. Une expérience très récente a démontré que, entre 6 et 9 mois, les enfants ont déjà établi des relations entre des signifiants et des signifiés de mots fréquents (parties du corps et noms d'aliments). Ils observent ces référents présentés sur des images, en dehors donc du contexte dans lequel ces mots et référents sont habituellement utilisés. Bien que les connaissances des enfants testés soient hétérogènes, leurs performances se situent au-dessus du hasard (Bergelson & Swingley, 2012). Notons toutefois que dans cette étude, ce sont les parents qui « interrogeaient » leurs enfants. Il avait été montré que la reconnaissance de mots est possible si la forme phonologique des mots est strictement adéquate à la forme phonétique mémorisée. Les mots mémorisés seraient codés en mémoire sous une forme détaillée et ne sont reconnus que s'ils correspondent exactement à cette forme. Il semblerait donc qu'à partir de cet âge, les enfants opèrent non plus dans le « dessein » de discriminer des différences phonétiques mais de traiter des unités pourvues de sens : les mots. La compréhension des mots implique le début de la constitution de leurs représentations mentales.

Dans le même temps, les émissions sonores de l'enfant vont prodigieusement évoluer passant du cri et de productions de sons végétatifs à la naissance à la production de phrases syntaxiques à 18 mois. Jusqu'à l'âge de 4 ou 5 mois, les productions vocales de l'enfant ne se réalisent qu'en position couchée et l'enfant ne maîtrise pas sa phonation. A partir de cette période, des modulations vocales apparaissent et les vocalisations deviennent progressivement

volontaires. Vocaliser est l'un des premiers comportements volontaires de l'enfant. De là, le répertoire sonore s'étend. L'enfant explore et développe les traits prosodiques de hauteur de la voix, leur niveau sonore et les traits consonantiques (bruits de friction, accolement des lèvres etc.). Les premières voyelles apparaissent au cours de cette période. Parallèlement il semble conscient des effets de ses gazouillis et commence à les utiliser de façon sociale pour communiquer ses émotions et ses demandes. Vers la fin du sixième mois, le bébé coordonne globalement les ajustements phonatoires et supraglottaux, de sorte qu'il parvient à stopper ses vocalisations à volonté, compétence fondamentale pour le contrôle vocal. Il est capable d'imiter les schémas intonatifs et peut régler la hauteur de ses vocalisations sur celles de son interlocuteur. L'établissement de cette capacité d'imitation des comportements vocaux de l'entourage permet un enrichissement du répertoire au cours des mois suivants et l'émergence du babillage. A partir de 7 mois, l'enfant commence à produire des syllabes qui respectent les contraintes des syllabes des langues naturelles. Les premières formes (babillage canonique) se caractérisent par la production de séquences consonne-voyelle. Les consonnes sont généralement des occlusives ou des nasales (/p/-/b/-/t/-/d/-/m/) combinées à des voyelles antérieures ou centrales basses (/a/ ou /ʌ/). Les syllabes sont souvent groupées en suites répétitives dont la rythmicité pourrait aider à relier les aspects sensoriels et moteurs des vocalisations. L'oscillation mandibulaire (ouverture-fermeture) requise pour la production de ces syllabes fournirait le cadre articulaire dont le contenu est assuré par les mouvements linguaux. Dès l'âge de 8 mois, les productions enfantines présentent des caractéristiques d'intonation et une organisation rythmique de la langue d'exposition. De même, les caractéristiques acoustiques des voyelles comme les formants correspondent aussi à celles de leur communauté linguistique (De Boysson-Bardies, Sagart, & Durand, 1984). Vers 10-11 mois, l'articulation devient plus nette et plus assurée. Dans le même temps, les suites de syllabes deviennent plus nombreuses et surtout on assiste à une variation des voyelles et des consonnes. Cet exercice de ses capacités articulatoires permet donc à l'enfant d'arrêter un cadre rythmique et syllabique qui fournit la base de la programmation articulaire des premiers mots (De Boysson-Bardies, 2005). L'apparition des premiers mots est très variable mais se situe globalement entre 11 et 14 mois et les enfants mettent entre 5 à 6 mois pour arriver à un lexique d'une cinquantaine de mots. A partir de 18 mois, le lexique de l'enfant s'enrichit prodigieusement et la combinatoire s'affine.

2. Expliquer le développement des compétences langagières

Pour développer de telles compétences, divers mécanismes doivent être mis en œuvre, comme la capacité de segmenter le flux linguistique qui lui parvient. Les spécificités des interactions sociales et affectives que Kuhl et collaborateurs (2010) regroupent sous les termes de *Social Gating Hypothesis* jouent un rôle facilitateur. De plus, la possibilité de produire les sons de la langue à laquelle les enfants sont exposés découlerait d'un couplage perceptivo-moteur qui permettrait que soient stockés en mémoire des patterns auditifs qui guideraient les enfants dans leurs approximations motrices successives jusqu'à ce que la représentation auditive soit complètement matchée à la réalisation articulaire.

2. 1. Apprentissage statistique

Pour apprendre le langage, l'enfant (mais aussi l'adulte confronté à une langue étrangère) doit extraire les unités pertinentes (mots) du flux continu qui lui parvient. Deux hypothèses ont été formulées : les individus, dès le plus jeune âge pourraient présenter une

sensibilité à la fréquence de co-occurrence des événements. Imaginons un corpus fréquemment adressé aux bébés, comme « oh, le joli bébé ! ». Les probabilités de successions (probabilités transitionnelles) des syllabes [jo] et [li] sont plus fortes dans le langage naturel que celles des successions [le] et [jo] ou encore entre [li] et [bé]. Cette hypothèse a été testée par Saffran et collaborateurs (1996) qui ont fait écouter à des bébés de 8 mois un flux continu constitué de quatre non-mots présentés aléatoirement et de façon a-prosodique. Les indices des frontières des « mots » étaient basés sur les différences de probabilités transitionnelles entre les syllabes, plus fortes en intra-mots qu'entre les mots. Après la phase de familiarisation, des mots de ce langage artificiel et de nouveaux mots ont été présentés aux enfants. Les enfants ont démontré une préférence pour les mots nouveaux de ce langage, ce qui indique une reconnaissance des mots entendus préalablement (Saffran, Newport, & Aslin, 1996).

L'autre hypothèse est soutenue par Perruchet et collaborateurs (Perruchet & Vinter, 1998), décrite dans le modèle PARSER. Les unités perceptives s'auto-organiseraient en devenant de plus en plus consistantes, isomorphes à la structure du matériel par la mise en jeu de processus élémentaires du fonctionnement de la mémoire (oubli et interférence). La perception est conçue comme une succession de foci attentionnels. A chaque focus attentionnel, un nombre de syllabes est capturé. Si elles sont perçues suffisamment souvent, elles deviennent une primitive perceptive qui est renforcée à chaque fois qu'elle est entendue. Les unités les plus fréquentes dominent par le fait que les unités moins fréquentes sont oubliées par le phénomène d'interférence. La perception s'auto-organise à l'aide des processus de renforcement, d'oubli et d'interférence.

2. 2. Rôle des interactions sociales

La *Social Gating Hypothesis* suggère que les interactions sociales créeraient une situation d'apprentissage particulière en permettant d'augmenter le niveau d'éveil et d'attention de l'enfant, apportant de l'information mais aussi développeraient les compétences pragmatiques et activeraient les réseaux cérébraux de couplage perceptivo-moteurs.

Dans la plupart des cultures, les mères, s'adressant à leur bébé, utilisent un mode de communication spécifique, le *motherese*. Dès les premières semaines de vie du bébé et tout au long de la période prélinguistique, les échanges mère-enfant sont organisés en termes de tour de rôle et de réciprocité. Ces échanges se construisent à partir des productions vocales du bébé qui ont un effet déclencheur du comportement maternel. Les mères imitent puis interprètent les productions vocales des enfants. Leur voix est plus aigüe, les modulations des contours intonatifs exagérées, les formes mélodiques sont longues et douces. Les répétitions syllabiques sont fréquentes (Papousek, Papousek, & Haekel, 1987). Les mères accompagnent souvent ces modifications vocales d'expressions faciales exagérées, de mouvements rythmiques du corps ou d'ajustements de leur posture qui permettent de focaliser l'attention du bébé, le motiver pour favoriser les échanges (Pegg, Werker, & McLeod, 1992). En outre, l'organisation prosodique du *motherese* permet de valoriser la structure phonétique et rythmique des mots et des phrases. Les pauses rythmiques situées aux frontières des propositions jouent un rôle dans le développement de la segmentation des unités de sens de la parole continue (De Boysson-Bardies, 2005), l'acquisition du lexique et de la syntaxe (Millotte et al., 2010).

Le regard de la mère dans les échanges joue un rôle considérable dans la mobilisation de l'attention du bébé (capture attentionnelle). Le contact œil à œil initial se modifie au cours des premiers mois et les regards vont alterner entre les objets et les personnages de la dyade. L'adulte peut orienter son regard et ses commentaires vers ce qui retient l'attention du bébé,

de même qu'il redirige l'attention et le regard vers un objet auquel le bébé n'avait pas prêté attention. Vers 9 mois, l'enfant est capable de diriger son regard dans la direction du tuteur (Brooks & Meltzoff, 2005). Cette compétence est à l'origine du développement de l'attention conjointe. L'attention conjointe désigne un ensemble de compétences sociales qui permettent de suivre efficacement ce que les adultes regardent mais aussi de s'engager dans des échanges. A un moment de son développement, l'enfant dirige son attention vers l'objet de l'échange et aux réactions du partenaire au fil de l'échange. C'est vers l'âge de 9 mois, que les enfants s'engagent dans des comportements d'attention conjointe (Tomasello, 2005), période à partir de laquelle ils commencent à devenir actifs dans la relation avec l'adulte, utilisent leur voix à des fins intentionnelles ainsi que des gestes déictiques (pointage, donner, montrer), leur permettant de diriger et partager l'attention de l'adulte sur un élément tiers (Bruner, 1975). A cette période apparaissent également des gestes de représentation (par exemple dormir, avion) et des gestes conventionnels culturellement définis (applaudir). Progressivement, ces premiers gestes qui font partie de routines quotidiennes vont être utilisés de manière référencée et désignent de nouveaux objets ou événements indépendants. La co-orientation conjointe de l'attention conjointe et le pilotage de l'activité conjointe sont deux fonctions pragmatiques fondamentales impliquées dans le développement des habiletés pragmatiques ultérieures qui se manifestent dans les fonctions communicationnelles du langage.

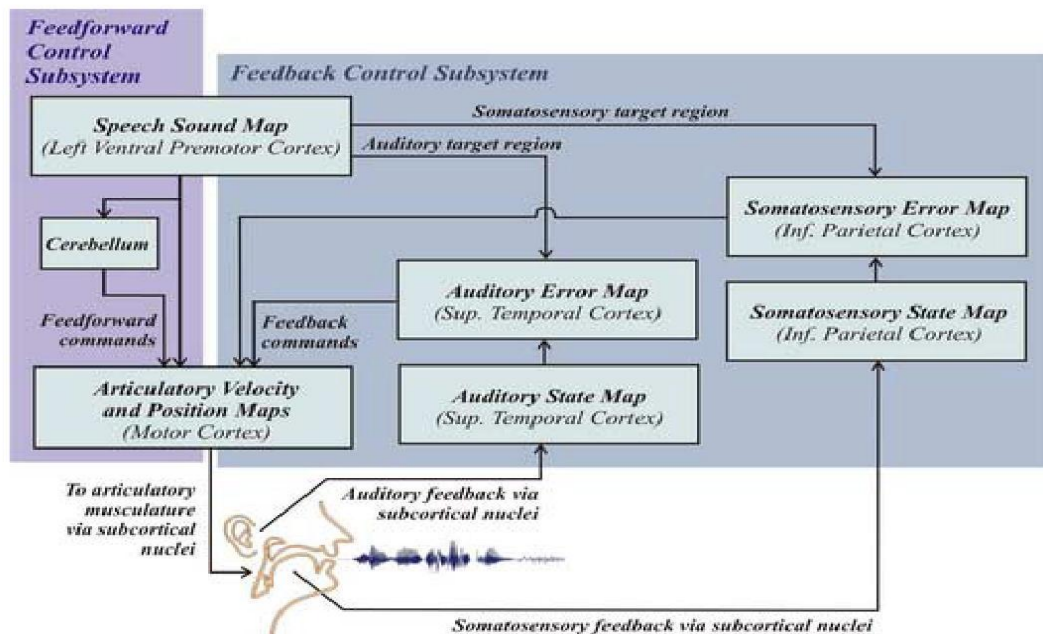
La maîtrise du langage contribuerait fortement au développement du contrôle exécutif et de la capacité à inhiber un comportement spontané. Le contrôle exécutif est plus effectif chez les adultes bilingues (Wang, Kuhl, Chen, & Dong, 2009) mais aussi chez les enfants bilingues (Carlson & Meltzoff, 2008). Chez les enfants monolingues, le déclin de la sensibilité aux contrastes phonétiques non-pertinents (permettant aussi un développement plus rapide du langage) est associé à une augmentation des mécanismes inhibiteurs, suggérant que des mécanismes cognitifs généraux joueraient un rôle dans l'augmentation des performances dans la langue natale et parallèlement supprimerait la sensibilité à des contrastes phonétiques non pertinents (Kuhl & Rivera-Gaxiola, 2008).

2. 3. Le modèle DIVA (Guenther, Ghosh, & Tourville, 2006)

Le DIVA (Directions into Velocities of articulators) modèle est un modèle neuroanatomique et neurofonctionnel qui rend compte des transformations sensorimotrices soutenant le développement et le contrôle des mouvements articulatoires de la parole. Il précise le rôle du feedback auditif dans un rétrocontrôle global et l'ajustement des commandes de préparation du mouvement articulatoire (planification). Selon ce modèle, au cours de la période de babillage, les productions articulatoires permettent de développer les différentes connexions synaptiques des mécanismes de feedback auditif, tactile et proprioceptif et sont utilisés pour créer des représentations neuronales. Après la période de babillage, le modèle permet l'apprentissage de nouveaux sons à partir d'input auditifs et peut produire des combinaisons arbitraires de sons. Ce modèle comprend deux types de commandes en interaction: une planification (feedforward) et un contrôle (feedback). La production d'un phonème, par exemple /a/, débute par l'activation des cellules motrices spécialisées dans la production de ce phonème, situées au niveau du cortex prémoteur ventral. Cette aire entretient des projections avec les neurones miroirs qui sont activés par la vue ou l'audition de l'action d'autrui (Rizzolatti, Fadiga, Gallese, & Fogassi, 1996) et, selon le DIVA modèle, guideraient les mouvements articulatoires à produire. Ensuite, des informations sont envoyées depuis le cortex prémoteur aux aires corticales auditives et somatosensorielles qui encodent les attentes sensorielles pour ce phonème. Des projections vers le cortex moteur et le cervelet complètent la planification motrice. Des projections entre les cortex prémoteur et

auditif encodent la forme sonore attendue. Ces projections sont exercées en écoutant les sons de la langue à laquelle on est exposé et par l'écoute des auto-corrections. Pendant la production du /a/ pour poursuivre avec notre exemple, le signal sonore planifié est comparé au signal acoustique reçu. Lorsqu'une erreur sonore est détectée, un signal est envoyé du cortex auditif au cortex moteur qui va réaliser une correction. Des connexions entre le cortex moteur et les aires somatosensorielles encodent les attentes proprioceptives qui découlent de l'expérience articulaire correspondant à notre phonème /a/ et permettent de contrôler les conséquences somatosensorielles de la production articulaire. Si une erreur articulaire est repérée, une commande motrice corrective est envoyée via les projections entre les aires somatosensorielles et les aires motrices. La figure 2 présente le schéma du modèle réalisé par l'auteur (Guenther et al., 2006).

Figure 2 : Schéma du modèle DIVA par Guenther et collaborateurs (2006)



Selon ce modèle, la production de la parole serait donc contrôlée par deux mécanismes complémentaires (planification et feedback multimodal) qui se développent précocement. Ce modèle rend également compte des modifications neurologiques liées à l'expérience articulaire, tant dans les aires auditives que prémotrices et motrices. Nous pensons pour notre part, que les mêmes processus seraient à l'œuvre dans le développement du contrôle de la voix (hauteur, intensité).

3. Résumé

En résumé, chez l'enfant normo-entendant, les compétences langagières émergeraient des interactions entre un pré-équipement à traiter des informations auditives de façon sophistiquée, des interactions sociales qui permettent de guider l'attention des enfants vers les aspects pertinents de la parole et d'inscrire les échanges dans un but de communication, et le développement d'un mécanisme de production de la parole qui inclut, à partir de la formation de représentation phonétiques liées à l'écoute et à la production phonétique, des processus de planification et de contrôle auditif, kinesthésiques et proprioceptifs. Ces compétences se développent à des moments au cours desquels les possibilités de maturation neuronale sont

maximales et propices (périodes critiques). On comprend dès lors, chez l'enfant sourd tardivement diagnostiqué, une carence à chacun de ces trois niveaux qui entraîne après réhabilitation de l'audition non seulement un retard du développement de ces processus mais aussi des difficultés pour les acquérir compte-tenu de processus de maturation neuronale liés aux caractéristiques de leur expérience individuelle.

Chapitre 3 : Développement du langage, compétences linguistiques et cognitives des enfants sourds

Nous avons vu précédemment que le comportement vocal de l'enfant produit des effets stimulants au cours des échanges avec l'adulte. Au cours des différentes étapes du développement prélinguistique les productions vocales de l'enfant sourd, ainsi que son comportement communicatif vont se différencier de celui de l'enfant entendant. A partir de deux mois, 50% des schémas mélodiques des productions des enfants sourds profonds sont plats (absence de contour) et la longueur des énoncés réduite comparativement à celle des enfants entendants. Ces types de production (contour plat et brièveté des énoncés) ne produisent pas d'effet sur l'interlocuteur et ne sont pas intégrés dans un dialogue. L'enfant sourd profond est donc quantitativement et qualitativement moins enrôlé dans une conduite d'échange, reçoit moins de renforcements (voire aucun) de la part de l'adulte et le feed-back auditif de ses propres productions est absent. La conséquence est triple. Le comportement vocal a tendance à disparaître du répertoire de l'enfant. L'exercice moteur de la sphère buccale qu'impose la production de babillage, de même que la coordination de la respiration sont indispensables à la précision ultérieure de l'articulation et à la qualité de la voix. La non-intégration de la production vocale de l'enfant dans un échange conversationnel impacte négativement la maîtrise des compétences conversationnelles et pragmatiques du langage (Vinter, 2005). C'est par le statut langagier accordé par l'adulte à la production vocale de l'enfant que celle-ci pourra passer de réflexe à intentionnelle et donc au langage de se développer. La section suivante rend compte des effets de la déprivation sensorielle sur le développement du langage et la variabilité des compétences langagières des enfants sourds profonds après implantation cochléaire ainsi que ses effets sur le contrôle vocal.

1. Compétences langagières

La conséquence la plus invalidante de la surdité profonde pré-linguale est l'accès au langage oral. Le langage débute après la mise en place d'un appareillage efficace, sous l'effet conjoint de la stimulation auditive et de la rééducation. L'étude des compétences langagières en réception et en production des enfants implantés est considérée par de nombreux auteurs comme un indicateur pertinent pour quantifier ou qualifier la fonctionnalité des capacités auditives. Par exemple, la qualité de la boucle audiophonatoire est appréciée par l'intelligibilité du discours (Geers, 2004). D'autres études évaluent la taille du lexique en réception (Dillon, de Jong, & Pisoni, 2012; Geers, Nicholas, & Moog, 2007), le liant à d'autres composantes cognitives comme la mémoire verbale à court terme (Burkholder & Pisoni, 2003). Cependant, si le lien de causalité entre surdité et difficulté d'acquisition du langage oral est établi, le niveau de compétences langagières ne saurait à lui seul refléter la fonctionnalité de l'audition. La surdité n'affecte pas seulement les compétences langagières mais les possibilités d'acquisition du langage (Mayberry, 2002). L'évaluation du langage oral

s'effectue, en réception et en production selon 3 composantes que sont la phonologie, le lexique et la syntaxe (De Raeve, 2010; Spencer, 2004, voir Peterson, 2010 pour une revue). Les aspects extra-linguistiques (prosodie) sont en revanche peu documentés.

L'étude des déformations en parole (intelligibilité de la parole en répétition de syllabes et de mots) permet d'apprécier l'acuité de la réalisation phonémique. La littérature démontre une grande variabilité concernant les aptitudes de production phonémique mais aussi une grande variabilité des procédures d'évaluation utilisées. Une méta-analyse de Flipsen (2008) porte sur 10 études longitudinales utilisant le paradigme du Speech Intelligibility Rating Scale (basé sur une moyenne de notation inter-juges effectuée selon une graduation de 1 = parole inintelligible jusqu'à 5 = parole compréhensible par tous les auditeurs). Les résultats montrent que chez les jeunes enfants de 3 et 5 ans, qui ont une expérience de durée d'utilisation de leur implant cochléaire restreinte (1 an), l'intelligibilité globale ne dépasse pas 20%. En revanche, il existe une corrélation positive entre le temps d'utilisation de l'implant et les scores à l'échelle d'intelligibilité qui dépassent 80% cinq ans après l'implantation. On ne sait pas dans quelle mesure les progrès effectués dans l'analyse acoustique des sons de la parole (augmentation du traitement perceptif des « modèles » et des performances du feed-back auditif) sont freinés par des difficultés praxiques résiduelles affectant la sphère buccale.

Wu et collaborateurs (Wu, Yang, Lin, & Fu, 2007) ont utilisé un autre paradigme auprès de 10 enfants âgés en moyenne de 5 ans 8 mois (7 implantés et 3 appareillés avec des prothèses auditives) pour tester la perception phonétique dans leur langue maternelle (le Mandarin). La tâche consistait à presser des touches correspondant aux phonèmes et tons entendus, soit 6 voyelles, 19 consonnes et 4 tons). Ils ont estimé les scores de reconnaissance des voyelles autour de 61%, celles des consonnes 40% et celle des tons autour de 55%. Ce score brut est toutefois difficile à interpréter car la norme de reconnaissance des mêmes stimuli par des enfants entendants n'est pas communiquée. De plus, les différences entre les enfants implantés et ceux porteurs d'une prothèse auditive ne sont pas rapportées.

La conscience phonologique (capacité à manipuler les sons de la langue) des enfants sourds se développe même en l'absence d'input auditif par l'utilisation des indices visuels fournis par la lecture labiale (Conrad, 1979). Ainsi, la qualité de la conscience phonologique est corrélée aux performances en lecture labiale. Les habiletés phonologiques ont été caractérisées chez un groupe de 27 enfants sourds congénitaux, âgés de 6 à 14 ans, tous porteurs d'implant cochléaire (Dillon et al., 2012). Les tâches consistaient à identifier des phonèmes isolés et dans des syllabes, effectuer des élisions, des ajouts ou des fusions de phonèmes, compter et reconnaître l'ordre de syllabes dans des pseudomots. Comparés à la norme obtenue pour ce test avec des enfants normo-entendants, 68% des enfants sourds se situent entre +1 et -1 écarts-types de la moyenne, 32% sont inférieurs à -1 écart-type. Leurs patterns de performances diffèrent de ceux des entendants par leurs succès relatifs dans les différentes tâches. Alors que le comptage syllabique est la tâche la plus simple pour les enfants entendants (Gillon, 2004), c'est l'identification des phonèmes isolés que les enfants sourds de cette étude ont le mieux réussi. On ne sait pas si la présentation des items était audio-visuelle (et donc redondance des informations) ou uniquement auditive. Cependant, ces résultats reflètent probablement l'habitude des enfants sourds à traquer la présence et l'emplacement des phonèmes isolés, ce type de tâche étant généralement très employé en rééducation (voir chapitre 5, sections 1 et 2).

Les études menées sur la taille du lexique en réception chez les enfants porteurs de prothèses sont anciennes, et des facteurs comme l'avancée de l'âge du diagnostic et donc du début de prise en charge et la mise au point de prothèses numériques tendraient à rendre ces données obsolètes. La littérature récente aborde majoritairement cette question auprès d'enfants porteurs d'un implant cochléaire. Les variables indépendantes étudiées sont l'âge d'implantation, le mode de communication usuel ou encore le type d'établissement scolaire

fréquenté. Les résultats convergent cependant vers les constats suivants : les enfants implantés présentent un âge de développement lexical en réception inférieur à ceux des enfants normo-entendants de même âge chronologique (Blamey et al., 2001). De plus, leur progression annuelle serait inférieure à un an, ce qui implique un cumul de retard. Les auteurs attribuent ces résultats aux effets spécifiques de l'absence d'input sonore sur la maturation cérébrale (voir section suivante de ce chapitre). Des résultats ultérieurs précisent que le retard accumulé ne concerne aucune classe de mots en particulier et correspond très sensiblement à la période de surdité, ce qui permet d'établir un âge de développement équivalent à la période d'audition fonctionnelle (Fagan & Pisoni, 2010). Dans leur étude longitudinale menée auprès de 65 enfants implantés (Hayes, Geers, Treiman, & Moog, 2009) ont également remarqué un retard dans l'âge de développement lexical mais une progression annuelle supérieure à un an chez des enfants qui ont été implantés récemment, et ont bénéficié de ce fait des dernières technologies. D'autre part, le développement lexical est positivement corrélé à l'âge d'implantation, avec un avantage certain pour les enfants qui ont été implantés les plus précocement (Hayes et al., 2009; Tomblin, Barker, Spencer, Zhang, & Gantz, 2005). Le vocabulaire en réception des enfants implantés avant l'âge de 2 ans serait comparable à celui des enfants normo-entendants (Connor, Craig, Raudenbush, Heavner, & Zwolan, 2006).

La production des premiers mots fait l'objet d'un enseignement systématique et la prononciation du premier mot de l'enfant sourd profond se situe autour de 16 mois. Il faut attendre en moyenne 7 mois pour passer de 1 à 10 mots. A 29 mois, le lexique produit se situe autour de 50 mots (Vinter, 2005). Parallèlement, on assiste à l'apparition de signes déictiques (pointage) souvent suivis de signes figuratifs créés par l'enfant lui-même palliant le déficit lexical (Virole, 2005).

L'apparition des premiers énoncés syntaxiques (combinaison d'au moins 2 mots) est fortement dépendante de la taille du lexique. Les combinaisons de deux mots sont produites lorsque le stock lexical contient une cinquantaine de mots. Le vocabulaire en production et le développement syntaxique chez les enfants de 3 ans sourds profonds appareillés ont été recensés au cours d'une dyade mère-enfant d'une durée de 30 minutes. Des jouets étaient à la disposition des participants. Le nombre de mots différents utilisés s'élevait en moyenne à 35 (210 pour le groupe contrôle) et la longueur moyenne des productions était de 1,5 mot (3,2 pour le groupe contrôle ; Nicholas, 2000) . La même procédure a été utilisée chez des enfants de 3,5 ans implantés plus précocement (2,5 ans). Le nombre de mots utilisés était beaucoup plus conséquent (122 mots en moyenne) de même que la longueur des énoncés qui passait à 2,38 mots (Nicholas & Geers, 2006).

2. Contrôle vocal

Des altérations profondes des qualités de la voix des enfants sourds profonds sont rapportées dans la littérature. Certains paramètres vocaux directement liés à la fonction auditive, comme le contrôle de la hauteur de la voix (fréquence fondamentale ou Fo), la variabilité d'amplitude et de fréquence (vAM et vFo) sont affectés par la surdité (Deqhan & Scherer, 2011), ce, depuis la période prélinguistique (Iyer & Oller, 2008). Des auteurs ont examiné les effets de l'implant cochléaire sur les aptitudes perceptives des enfants en étudiant la qualité de la bouche audio-phonatoire, les caractéristiques de leur voix et la précision articulatoire (étude des formants vocaliques). Des approches méthodologiques variées de même que la taille des échantillons étudiés rendent difficiles les comparaisons des résultats. Perrin et collaborateurs (Perrin, Berger-Vachon, Topouzkhanian, Truy, & Morgon, 1999) ont étudié chez 4 enfants implantés âgés de 9 à 14 ans appariés à 4 sujets contrôles entendants les valeurs de la fréquence fondamentale (Fo) et des 3 premiers formants de 11 voyelles extraites

d'un texte lu. Ils obtenaient chez les enfants implantés des valeurs supérieures et chez les contrôles des valeurs inférieures aux normes utilisées. Seifert et collègues (Seifert et al., 2002) ont étudié les valeurs de Fo ainsi que celle des formants du /a/ isolé et prolongé chez 20 sujets âgés de 3 ans 8 mois à 10 ans et 2 mois. Ils ont trouvé une variabilité des valeurs, certains sujets présentant des valeurs supérieures et d'autres inférieures à la norme. Ils ont également mis en évidence un effet de l'âge d'implantation, les valeurs et les écarts entre les formants du /a/ des enfants implantés avant l'âge de 4 ans étant plus proches des normes utilisées. Utilisant la même procédure, Campisi et collaborateurs (2005) ont estimé chez 21 sujets âgés de 3,5 à 18 ans des valeurs de Fo dans la norme mais des difficultés spécifiques dans le maintien de la fréquence et de l'amplitude dans la tâche de production de voyelle prolongée (vFo et vAM). La durée d'utilisation influence la normalisation des variations d'amplitude à long-terme (vAM). Les sujets testés ne présentaient pas de troubles de la variabilité à court-terme de la fréquence (jitter) ni de l'amplitude (shimmer), ce qui n'est guère étonnant puisque les sujets testés étaient exempts de pathologie laryngée (Campisi, 2006; Campisi et al., 2005). Ces auteurs rapportent également des valeurs formantiques du /a/ soutenu normales. Des résultats plus nuancés ont été rapportés par l'étude d'un échantillon plus vaste, en particulier la grande inter-variabilité des valeurs (Baudonck, Van Lierde, Dhooge, & Corthals, 2011). L'efficacité directe du port de l'implant a été évaluée par la comparaison des valeurs de Fo de différentes voyelles extraites de mots et obtenues dans 2 conditions d'enregistrement, implant-on et implant-off (Poissant, Peters, & Robb, 2006). Les résultats soulignent l'importance du feedback auditif dans le monitoring de la voix et la précision articulatoire. Les enfants montrent en condition implant-off soit l'élévation typique de la Fo (2/3 des sujets) ou le patron inverse. Les valeurs des formants vocaliques étudiés sont également négativement affectées par la condition implant-off. Nous estimons que la méthodologie de cette étude permet aussi et surtout de mettre en évidence une utilisation fonctionnelle des informations auditives pour contrôler les émissions vocales (feedback auditif) telle que décrite dans le modèle DIVA (Guenther et al., 2006). En revanche, lorsque l'information auditive est supprimée, la nécessité des informations somatosensorielles et proprioceptives est augmentée, modifiant ainsi le comportement vocal et articulatoire, influençant les valeurs de la Fo et des formants vocaliques.

Les études qui se sont attachées à évaluer les bénéfices des prothèses auditives sont peu nombreuses malgré les progrès technologiques des prothèses numériques. Notons toutefois celle de Valero Garcia et collaborateurs (Valero Garcia, Vila Rovira, & Gonzalez Sanvicens, 2010) qui ont trouvé une supériorité dans plusieurs paramètres vocaux, comme la hauteur de la fréquence fondamentale, le shimmer et le jitter chez un groupe d'enfants de cinq ans appareillés avec des prothèses numériques comparativement à des enfants implantés ou appareillés avec des prothèses analogiques.

Enfin, nous n'avons pas trouvé d'études explorant les compétences des enfants sourds dans d'autres comportements vocaux, comme la voix d'appel ou la projection vocale. Le chant des enfants sourds, en revanche, a été étudié. Les résultats de ces études sont rapportés dans la section suivante de ce chapitre.

En résumé, la période de déprivation sensorielle auditive produit des effets négatifs sur le développement de la communication et du langage en réception et en production. Les caractéristiques acoustiques des productions vocales du bébé sourd produisent moins de conduite d'enrôlement dans des échanges communicatifs de la part de l'entourage et impacte négativement la maîtrise des compétences conversationnelles et pragmatiques du langage. L'apparition du langage, succédant à la mise en place d'un appareillage, est toujours retardée et ce retard est globalement conservé. Il concerne tous les constituants langagiers, à savoir le système phonologique, le lexique et la syntaxe. Des facteurs comme l'âge auquel l'audition a

été réhabilitée (âge d'implantation) ainsi que le type d'appareillage influencent toutefois leurs performances langagières globales mais aussi le contrôle de la voix, particulièrement la voix chantée.

Les limites techniques des appareillages (implants et prothèses) ne permettent pas un traitement fin de tous les indices acoustiques. La section suivante rend compte des difficultés perceptives des aspects extra-linguistiques du langage, comme la prosodie et la voix de même que dans d'autres domaines auditifs non langagiers, comme la musique.

3. Autres troubles perceptifs

Les caractéristiques technologiques des appareillages, particulièrement des implants cochléaires, limitent les richesses acoustiques des inputs sonores, et par là, la perception de certains indices extra-linguistiques qui pourraient soutenir et/ou affiner la compréhension du contenu langagier, comme la prosodie ou les voix. L'environnement sonore ne se limite pas au langage, et ces limites technologiques affectent également le traitement de la musique.

3. 1. Traitement de la prosodie par les enfants sourds porteurs d'implant cochléaire

La prosodie correspond aux faits phonétiques relatifs aux paramètres principaux que sont l'accentuation, l'intonation, le ton. Leurs variations jouent un rôle très important dans la compréhension de la parole en fournissant des renseignements sur le locuteur, comme son état émotionnel, ses intentions, ou encore le degré d'importance d'un mot ou d'une idée. Si l'utilisation de l'implant cochléaire, comparativement aux prothèses auditives, permet de meilleurs niveaux langagiers en réception et en production (en fonction de l'âge d'implantation, de sa durée d'utilisation et du degré d'implication familiale dans la prise en charge des enfants), il n'en est pas de même pour la perception des aspects suprasegmentaux. Most & Peled (2007) ont étudié un groupe de 30 enfants âgés de 8 à 15 ans (10 enfants porteurs d'un implant cochléaire et 20 enfants appareillés avec des prothèses auditives dont 10 enfants sourds sévères et 10 enfants sourds profonds. Tous les enfants ont été éduqués oralement et scolarisés en milieu ordinaire. L'étude comportait 4 tâches: 1) découpage syllabique 2) reconnaissance de la forme de la phrase (interrogative ou affirmative) 3) identification de l'accentuation syllabique dans des paires de même structure phonémique 4) identification de l'accentuation d'un mot dans une phrase. Pour chaque condition, les enfants devaient choisir la bonne étiquette écrite parmi plusieurs choix. Pour les épreuves de reconnaissance de forme de la phrase et d'identification d'accentuation syllabique, les enfants implantés ont présenté des performances inférieures à celles des 2 groupes d'enfants appareillés. Les groupes ne diffèrent pas pour les 2 autres épreuves (découpage syllabique et identification d'accentuation d'un mot). Les mêmes auteurs (Most & Aviner, 2009) ont examiné la reconnaissance des émotions à travers 3 situations expérimentales (visuelle, audio-visuelle et auditive). Des courtes vidéos mettaient en scène des personnes prononçant une même phrase de contenu sémantique neutre associée à des expressions faciales et prosodiques testant 6 émotions (colère, peur dégoût, joie, surprise et tristesse). Les vidéos étaient muettes pour la condition visuelle et sonorisées pour la condition audio-visuelle. La bande sonore (variations de la prosodie) était utilisée pour la condition auditive. L'étude impliquait 30 adolescents sourds répartis selon leur mode d'appareillage et la date d'implantation et un groupe contrôle de 10 participants normo-entendants. Les adolescents déficients auditifs ont montré des scores inférieurs à ceux des contrôles dans toutes les conditions. Le mode d'appareillage ne permet pas de différencier les participants sourds. Par contre leurs

performances sont hiérarchisées en fonction des modes de présentation (respectivement dans l'ordre, visuelle plus favorable qu'audio-visuelle, elle-même plus favorable qu'auditive).

3. 2. Reconnaissance des voix

Le signal acoustique de la parole, outre le contenu linguistique, fournit des indices concernant le locuteur, comme son sexe, son âge ou encore son état émotionnel. Pour l'auditeur, ces informations sont encodées de façon simultanée mais doivent faire l'objet d'extraction séparée. Une étude préliminaire menée chez des enfants sourds moyens et sévères appareillés avec des prothèses démontrait une bonne habileté à identifier le sexe du locuteur (Jerger, Martin, Pearson, & Dihn, 1995). L'aptitude des enfants sourds implantés à juger la similarité des voix a été évaluée dans l'étude de (Cleary & Pisoni, 2002). Quarante-quatre enfants âgés de 8 à 9 ans ont été recrutés pour l'étude. Les enfants devaient écouter deux phrases puis indiquer si elles étaient prononcées par le même locuteur. La moitié des essais étaient formés de 2 phrases de même contenu linguistique alors le contenu linguistique des phrases variait dans l'autre moitié des essais. La longueur des phrases était comprise entre 8 et 11 syllabes, pour une durée de 1,61 à 2,16 secondes. Les phrases étaient lues par 3 locutrices dont les voix étaient caractérisées par leur différence de timbre et de hauteur. Les enfants ont démontré de meilleures performances lorsque les phrases à comparer comportaient le même contenu sémantique (68%), comparativement à la condition dans laquelle le contenu sémantique variait (57%) tandis que des enfants normo-entendants de même durée d'audition fonctionnelle (soit un âge chronologique de 5 ans et demi) obtenaient 89% de réussite.

3. 3. Perception de la musique

Les caractéristiques de l'input auditif fourni par les implants cochléaires sont très différentes de celles des stimuli naturels (voir chapitre 1), rendant la perception de la musique plus difficile que chez les sujets de même déficit auditif mais appareillés conventionnellement (Looi, McDermott, & McKay, 2008) et très insatisfaisante chez les adultes sourds qui possédaient déjà une culture musicale (Gfeller et al., 2000a, voir McDermott, 2004 pour revue). En revanche, les enfants sourds prélinguaux ne peuvent évaluer la musique en référence aux standards acoustiques. De plus, ils évoluent souvent dans un environnement dans lequel la musique est très présente et apprécient des activités qui mettent la musique en jeu, comme la simple écoute, la danse, le chant, voire la pratique instrumentale (Gfeller, Witt, Spencer, Stordhal, & Tomblin, 1999). De plus, tout comme chez les entendants, la musique aurait le pouvoir de modifier leur humeur (Hopyan-Misakyan, Gordon, Dennis, & Papsin, 2009). Dans une étude préliminaire, Nakata et collaborateurs (2005) ont évalué les capacités d'enfants âgés de 4 à 9 ans pour reconnaître les jingles familiers d'émissions télévisées. Chez des enfants implantés précocement, les performances sont correctes si les paroles sont associées aux mélodies, en revanche la version instrumentalisée ne permet pas la reconnaissance (Nakata, Trehub, Kanda, Shibasaki, & Schellenberg, 2005 ; Mitani, Nakata, Trehub, Kanda, Kumagami, Tabasaki et al., 2007). Ces derniers auteurs ont également introduit une tâche de répétition de 25 mots fréquents et ont trouvé une corrélation positive entre la précision de la répétition (liée à la précision de la perception auditive) et l'inclinaison des enfants pour l'écoute de la musique. Chez des enfants plus âgés également implantés (de 8 à 18 ans) la reconnaissance de chansons populaires est correcte pour la version originale, plus difficile pour la version instrumentalisée mais très faible pour les versions piano et rythmique (Vongpaisal, Trehub, Schellenberg, & Papsin, 2004 ; Vongpaisal, Trehub, & Schellenberg, 2006). Les auteurs suggèrent donc que les indices verbaux ne sont pas

indispensables mais facilitent l'identification des chansons familières. Le succès relatif de reconnaissance des chansons présentées en version instrumentalisée suggère que malgré des difficultés d'identification des timbres, l'utilisation de ces indices acoustiques contribue à la reconnaissance musicale. Nous supposons pour notre part une forte contribution du traitement des informations temporelles.

Une des caractéristiques fondamentales de la musique est son fort pouvoir émotionnel. La co-variation du mode (majeur ou mineur) et du rythme rend compte de l'identification émotionnelle d'une pièce musicale (Dalla Bella, Peretz, Rousseau, & Gosselin, 2001). Compte-tenu des difficultés des enfants sourds à identifier les émotions véhiculées par les variations prosodiques du langage, qu'en est-il de l'appréciation du contenu émotionnel des séquences musicales ? Pour tenter de répondre à cette question Hopyan et collaborateurs (Hopyan, Gordon, & Papsin, 2011) ont étudié l'identification de la valence émotionnelle (opposition gaité-tristesse à l'aide de smileys très expressifs) chez des enfants de 7 à 13 ans implantés et utilisateurs de la langue orale. Ils se distinguent du groupe contrôle entendant par des performances inférieures (toutefois au dessus du hasard) et par une asymétrie des patterns de reconnaissance en faveur de la valence gaie, que les auteurs attribuent aux limitations de résolution spectrale des implants mais un traitement efficace des informations temporelles. Cette étude comporte toutefois des limites. Les enfants ne pouvaient choisir qu'entre deux types d'émotions musicales qui pouvaient se différencier essentiellement par leur tempi (Dalla Bella et al., 2001). Il serait intéressant de vérifier si la reconnaissance de la valence gaie persiste dans des oppositions émotionnelles manifestées par des patterns plus proches, comme gaité et colère ou gaité et peur.

L'évaluation des habiletés perceptives des sourds réhabilités dans le domaine de la musique souffre actuellement d'un manque d'outil, certaines tâches du MBEA (Montreal Battery of Evaluation of Amusia, Peretz, Champod, & Hyde, 2003) n'étant pas adaptées pour les implantés (Cooper, Tobey, & Loizou, 2008). Des simulations de signal tel que délivré par un implant cochléaire menées chez des participants normo-entendants montrent que la reconnaissance de mélodies familières nécessiterait entre 32 et 64 électrodes (Kong, Cruz, Jones, & Feng, 2004).

La surdité impacte les caractéristiques du chant des enfants implantés. L'étendue vocale des enfants sourds de 5 à 12 ans est considérablement plus limitée (76,58 Hz) que celle des enfants entendants (238,83 Hz). Le contour mélodique n'est pas respecté, les changements de hauteur seraient perçus mais pas leur direction, de sorte que leur chant ressemble à celui d'amusiques (Nakata, Trehub, Mitani, & Kanda, 2006). En contraste, les patterns rythmiques sont aussi bien produits que chez les enfants entendants (Xu et al., 2009).

En résumé, des difficultés perceptives liées aux caractéristiques techniques des appareillages limitent la perception des éléments extralinguistiques que sont la prosodie et les caractéristiques des voix. Ce phénomène permet peu aux enfants de tirer bénéfice de la redondance des informations linguistiques et extralinguistiques pour affiner leur compréhension. De plus, les enfants sourds présentent des difficultés pour reconnaître les émotions présentées auditivement mais également selon une modalité audio-visuelle et visuelle. Si les enfants sourds apprécient l'écoute de la musique, la reconnaissance correcte des chansons implique que tous les constituants soient présents (paroles et mélodie). La surdité (et/ou les appareillages) affectent également la reconnaissance des émotions musicales et les enfants sourds obtiennent des performances inférieures à celles des enfants normo-entendants.

De plus, le langage étant impliqué dans le développement de compétences cognitives comme les fonctions exécutives, en particulier la mémoire de travail, les performances des enfants sourds seront affectées par leur niveau langagier. Enfin, les enfants sourds présentent

des difficultés spécifiques pour traiter les informations séquentielles. La section suivante rend compte de ce champ de recherche.

4. Les troubles cognitifs

Nous avons vu que la conséquence première de la surdité profonde, la plus apparente et la plus invalidante sur le plan social et cognitif pour les individus touchés concerne les difficultés d'apprentissage du langage oral. Les compétences sensorielles, perceptives et cognitives liées au développement du langage et la de parole émergent plus ou moins spontanément après réhabilitation de la transduction sonore (prothèses ou implant cochléaire) et se poursuivent au fil du temps. Au cours de la première année suivant l'aide audioprothétique, des progrès notoires sont accomplis dans différents domaines comme la communication (Shin et al., 2007) ou l'attention visuelle (Quittner, Smith, Osberger, Mitchell, & Katz, 1994). Les progrès sont attribués tant à l'apprentissage perceptif (rééducation, voire même effets de l'éducation précoce) qu'à l'exposition répétée aux modèles langagiers émanant de l'environnement de l'enfant (voir Sharma 2002).

Cependant, le cortex auditif étant fortement interconnecté avec d'autres aires cérébrales, il est attendu que l'absence précoce d'input auditif et le retard de maturation du cortex auditif constaté (voir section suivante) impactent aussi certains processus qui ne sont pas directement liés aux processus auditifs précoces. Citons par exemple le développement des circuits neuronaux du cortex frontal qui sont impliqués dans les fonctions exécutives et le contrôle cognitif (allocation de ressources attentionnelles) la mémoire de travail, en particulier le traitement de la séquentialité des informations, l'inhibition, la planification et la résolution de problèmes. Une corrélation étroite entre les bons scores aux mesures de perception de la parole et du langage et les compétences dans ces domaines a d'ailleurs été rapportée (Svirsky, Robbins et al 2000).

4. 1. Contrôle cognitif et fonctions exécutives

Les fonctions exécutives sont des processus généraux et sont impliquées dans l'organisation et la régulation des actions, pour diriger les réponses comportementales non automatiques, émotionnelles et cognitives, de même que les actions dans des environnements variés, en particulier dans des contextes nouveaux dans lesquels l'individu se trouve dans une situation de résolution de problème. Elles impliquent la mémoire de travail, la planification, l'initialisation, le monitoring et la flexibilité nécessaires pour corriger les actions en fonction de leurs effets (prise en compte du feedback). Elles concernent également les capacités attentionnelles (attention soutenue et attention divisée), l'inhibition (contrôle de l'impulsivité). Elles permettent de sélectionner les buts et actions appropriées pour y parvenir ainsi que le maintien des informations tout en accomplissant la tâche (mémoire de travail Hughes, 1998). Les fonctions exécutives ne seraient pas une fonction unitaire mais comprendraient un panel d'habiletés dissociables de sorte que des profils hétérogènes se dégagent (Miyake et al., 2000).

4. 1. 1. Mémoire à court terme et Mémoire de travail

Mémoire à court terme et mémoire de travail sont particulièrement importantes dans le maintien et le traitement des informations car elles constituent le maillon essentiel entre l'input sensoriel et le stockage de l'information en mémoire à long terme (Baddeley, 1992).

Elles jouent un rôle important dans la perception et le traitement du langage. Le développement de la mémoire verbale, dépendant en partie de l'expérience auditive, est affecté à des degrés divers par la surdité prélinguale. Dans des tâches d'empan de chiffres endroit et envers, les enfants implantés cochléaires démontrent des capacités inférieures à celles d'enfants normo-entendants contrôles (voir Harris et al., 2011 pour une méta-analyse). Les performances sont par ailleurs corrélées à la modalité linguistique dans laquelle les enfants évoluent et à leur score de vocabulaire en réception (Pisoni & Cleary, 2003). Les enfants éduqués oralement et dont les performances langagières sont comparables à celles d'enfants normo-entendants, présentent des scores en mémoire de travail supérieurs à ceux des enfants éduqués en communication totale, eux-mêmes supérieurs aux enfants utilisateurs de la langue des signes (Burkholder & Pisoni, 2003). Par exemple, ces auteurs ont trouvé un empan endroit de 8 chiffres chez des enfants entendants de 8 ans et demi, contre 5 chiffres chez les enfants sourds éduqués oralement et de 4 chez ceux éduqués en communication totale. Chez l'adulte sourd prélingual, l'empan de chiffres endroit moyen est de 5 items (Bellugi & Fischer, 1972).

La rapidité du débit articulatoire interfère avec les scores aux épreuves d'empan de mémoire de travail. Les individus qui parlent le plus vite sont aussi ceux qui présentent les meilleurs scores de mémoire de travail (Baddeley, Thomson, & Buchanan, 1975). Chez les enfants sourds, pourtant, une corrélation négative a été retrouvée entre les mesures d'empan inverse et le débit. Ceci pourrait être dû soit à un processus de maintien via la boucle phonologique trop lent, soit à une lenteur du traitement de l'information (Cowan et al., 1998). Les capacités de scanner les informations contenues en mémoire de travail (mesurées par la longueur des pauses entre les items à rappeler (Cowan 1994) seraient affectées. Burkholder et collaborateurs (Burkholder & Pisoni, 2003) ont retrouvé des durées de pauses inter-mots dans le rappel trois fois supérieures à celles des enfants normo-entendants contrôles. Les stratégies subvocales de maintien ainsi que les capacités de scanning des informations pourraient donc dépendre de l'expérience et pourraient refléter le développement de circuits sensori-moteurs basiques utilisés en perception et en production du langage (Pisoni et al., 2008).

L'empan de mémoire à court terme non verbale a également été exploré chez des enfants implantés âgés de 8-9 ans à l'aide d'un « Simon ». L'appareil délivre simultanément des séquences de sons associées aux flashes lumineux correspondants. La tâche consiste à reproduire la séquence entendue et vue en pressant les touches dans l'ordre de présentation. Si l'item est réussi, la longueur de la séquence augmente d'un item. Dans sa version commerciale, les 4 touches lumineuses et colorées sont associées à 4 sons. Pour les besoins de l'expérience, Cleary et collaborateurs (Cleary, Pisoni, & Geers, 2001) ont adapté ce matériel et construit 3 conditions expérimentales : condition auditive (nom de la couleur), condition visuelle (flash lumineux coloré) et condition auditivo-visuelle (nom de la couleur et flash lumineux coloré). Au cours des essais, la présentation des items était randomisée de sorte qu'il n'y ait pas répétition des événements. Les enfants sourds présentent dans les 3 conditions des scores inférieurs à ceux des enfants normo-entendants contrôles (par exemple 2.9 chez les enfants sourds contre 4.5 chez les entendants pour la modalité auditive) mais une supériorité de la modalité visuelle sur la modalité auditive (pattern inverse chez les contrôles) et un avantage dans la condition auditivo-visuelle (Cleary et al., 2001). Les observations des auteurs indiquent que les enfants sourds semblent utiliser les mêmes stratégies de codage que les contrôles (codage verbal).

Une expérience suivante a été conduite avec le même paradigme afin d'apprécier les effets de la répétition des événements. Lorsque les enfants reproduisaient correctement une séquence, un nouvel élément était ajouté à la séquence. Ils devaient donc la reproduire à nouveau depuis le début (Pisoni & Cleary, 2004). Deux tiers des enfants implantés bénéficient donc de la répétition des premiers éléments de la séquence en démontrant une augmentation

de leurs capacités dans chacune des 3 conditions expérimentales (auditive, visuelle et auditivo-visuelle) mais leurs moyennes demeurent inférieures à celles des enfants contrôles (par exemple 4.9 pour les enfants sourds contre 7.2 chez les entendants en modalité visuelle).

4. 1. 2. Autres fonctions exécutives

Afin de vérifier la contribution du langage dans le développement des fonctions exécutives, Figueras et collaborateurs (Figueras, Edwards, & Langdon, 2008) ont conduit une vaste étude utilisant les tâches de la NEPSY (tâche de planification, de flexibilité mentale, de contrôle de l'impulsivité, mémoire de travail et attention visuelle) comparant les performances de 3 groupes d'enfants âgés de 8 à 12 ans en fonction de leur niveau langagier : enfants normo-entendants supérieurs aux enfants sourds implantés, eux-mêmes supérieurs aux enfants sourds porteurs de prothèses auditives. Les scores obtenus aux tâches d'inhibition et de flexibilité cognitive sont sensibles au statut langagier. Dans les tâches d'inhibition, les enfants sourds sont plus lents que les enfants normo-entendants, reflétant un plus grand effort pour inhiber leur réponse spontanée. De plus, ils commettent davantage d'erreurs que leurs pairs entendants. Ils présentent aussi des scores inférieurs aux enfants entendants dans les tâches de flexibilité mentale. Par contre, les 3 groupes d'enfants sont équivalents dans l'épreuve de planification, résolution de problème (Tour), de même que dans la tâche d'attention visuelle (retrouver des formes parmi d'autres). Cependant, si la tâche est plus complexe et implique plusieurs fonctions exécutives, les performances des enfants sourds sont moins bonnes que celles des enfants entendants. Cette hypothèse a été vérifiée par Quittner et collaborateurs (Quittner et al., 1994) qui a proposé une tâche d'attention visuelle sélective (presser une touche lorsqu'apparaît à l'écran le chiffre 9 précédé du chiffre 1). Les résultats dans le groupe des enfants sourds étaient influencés par le niveau langagier démontré par les enfants (ici supériorité du groupe des implantés). De même, les enfants sourds, qu'ils soient appareillés ou implantés présentent des performances nettement plus basses que celles des enfants entendants du même âge dans une tâche d'attention sélective (détection du 0 dans un flux de chiffres présentés sur un écran d'ordinateur, (Smith, Quittner, Osberger, & Miyamoto, 1998). L'ensemble de ces résultats suggèrent que l'exposition précoce à une langue, y compris la langue des signes et le niveau langagier semblent influencer le développement de l'attention. Dans les familles sourdes, l'ajustement de l'attitude parentale aux possibilités réceptives des enfants permettrait le développement d'habiletés attentionnelles supérieures à celles des enfants nés de familles entendant (Hauser, Lukomski, & Hillman, 2008).

4. 2. Le traitement séquentiel

Contrairement aux événements visuels qui peuvent durer dans le temps, les événements auditifs sont par nature transitoires et se succèdent dans le temps. Une fonction de l'audition se situe donc, par la perception séquentielle des événements auditifs, dans la structuration des durées et du temps. La représentation du temps demeure difficile chez les enfants sourds et le traitement séquentiel des événements sonores carencé. Pour certains auteurs, cette fonction de l'audition constituerait le fondement sur lequel l'apprentissage et le traitement des informations séquentielles reposeraient (*The auditory scaffolding hypothesis* ; Conway, Pisoni, Anaya, Karpicke, & Henning, 2011; Conway, Pisoni, & Kronenberger, 2009; Tomasello, Carpenter, Call, Behne, & Mol, 2005). Pour ces auteurs, la déprivation sensorielle précoce affecterait les processus généraux d'apprentissage implicite séquentiel, y compris dans les domaines non auditifs.

Conway et collaborateurs (Conway et al., 2011) ont testé les capacités d'apprentissage implicite séquentiel visuel chez des enfants de 7 ans et demi implantés. 4 blocs colorés étaient présentés sur un écran tactile et étaient activés séquentiellement. Les séquences variaient d'une longueur de 2 à 4 éléments pour la phase d'apprentissage et de 3 à 5 éléments pour la phase test. Les items de la phase d'apprentissage étaient sous-tendus par une grammaire artificielle et randomisés. Dans la phase de test, le nombre de nouveaux items construits selon la grammaire artificielle et d'items non grammaticaux était équivalent et la présentation randomisée. La tâche des sujets était de reproduire les séquences visuelles observées sans savoir qu'elles représentaient une phase d'apprentissage suivie d'une phase de test. Les auteurs ont formulé l'hypothèse que si les enfants avaient appris les règles de la grammaire au cours de la phase d'apprentissage, leurs scores de reproduction des séquences grammaticales de la phase test devraient être meilleurs que ceux obtenus pour les séquences non grammaticales. Le pourcentage de séquences correctement reproduites a été calculé. En phase test, les enfants entendants reproduisent significativement plus de séquences grammaticales que de séquences non grammaticales. Les enfants sourds ne démontrent pas de différence dans le rappel des séquences grammaticales vs. séquences non grammaticales. Les auteurs ont également calculé un score d'apprentissage basé sur la différence de précision de rappel entre les séquences grammaticales et non grammaticales. Ce score serait un indicateur du bénéfice de l'exposition à la grammaire artificielle lors de la phase d'apprentissage. Alors que la moitié des enfants entendants obtiennent un score d'apprentissage significativement supérieur à 0, seulement un tiers des enfants sourds tirent un avantage de la phase d'apprentissage. L'âge d'implant est négativement corrélé au score d'apprentissage tandis que la durée d'utilisation de l'implant est positivement corrélée. De même, les scores d'apprentissage sont corrélés aux performances langagières. Les enfants qui présentent de bons scores d'apprentissage sont également ceux qui démontrent de bonnes performances langagières. Les auteurs suggèrent que la surdité (surtout prolongée) engendrerait des difficultés plus générales d'apprentissage séquentiel implicite et expliquerait les difficultés d'apprentissage du langage rencontrées par les enfants sourds. Cette interprétation sera discutée dans l'article 7 de la partie expérimentale.

Les conclusions d'autres travaux confirment l'existence de difficultés des enfants sourds dans des fonctions non auditives liées à l'organisation temporelle des événements comme la perception du rythme (Rileigh & Odom, 1972), l'attention à l'ordre de présentation des stimuli (Horn, Davis, Pisoni, & Miyamoto, 2005; Quittner et al., 1994), le rappel sériel immédiat (Bavelier et al., 2008; Pisoni & Cleary, 2004) ou encore le séquençage moteur (Horn, Pisoni, & Miyamoto, 2006).

En résumé, la surdité et/ou le niveau de maîtrise langagière affectent certains aspects du développement cognitif. Dans les items sensibles au niveau langagier, comme l'inhibition ou la flexibilité cognitive, ou encore la mémoire à court terme et la mémoire de travail verbale et non verbale, les enfants sourds présentent des performances inférieures à leurs pairs entendants. Des résultats contradictoires ont été retrouvés dans les capacités d'attention visuelle, toutefois avec des tâches différentes. En revanche, leurs capacités de planification et de résolution de problème ne sont pas affectées par la surdité. L'expérience auditive, séquentielle par nature influencerait le traitement séquentiel et des difficultés spécifiques dans le traitement séquentiel ont été rapportées.

Il nous paraît nécessaire d'aborder la question de la surdité et des difficultés qu'elle provoque selon les multiples connexions existantes dans le cerveau, les réponses comportementales étant une fonction de longues séquences d'opérations de traitement. Les différentes étapes développementales des enfants sourds, comme la période de déprivation sensorielle prolongée, le type de correction auditive, les modalités linguistiques utilisées vont influencer structurellement et fonctionnellement le développement cérébral. Les

caractéristiques structurelles et fonctionnelles de leur système nerveux central en retour, influencent certaines performances cognitives et perceptives.

5. Plasticité développementale

Bien que certaines propriétés du système auditif reposent sur des mécanismes génétiquement programmés, l'organisation cérébrale dépend également pour une grande part de l'expérience et pour notre propos, des effets des apprentissages auditifs. La présente section rend compte des données actuelles concernant les particularités du développement cérébral liées à l'absence de l'input auditif précoce.

5. 1. Développement et maturation neuronale

Des études menées chez l'animal ont montré que lorsqu'une oreille perd sa fonction par destruction des cellules ciliées, une perte d'activité est constatée au niveau du nerf auditif (Tucci, Born, & Rubel, 1987), ce qui induit, en aval, une cascade de conséquences au niveau central. Les neurones qui sont normalement excités par les cellules ciliées internes d'une oreille devenue inactive deviennent eux aussi inactifs et pour partie dégénèrent. L'étude du noyau cochléaire ventral de la gerbille entendante met en évidence une disparition naturelle de neurones de l'ordre de 22% entre le 10^{ème} et le 12^{ème} jour de vie, suivi d'une stabilité du nombre restant. Puis entre le jour 15 et le jour 140, la taille du noyau cochléaire augmente de 57% (Tierney & Moore, 1997). En revanche, si la surdité survient avant que l'audition ne soit fonctionnelle, de 50 à 90% des neurones du noyau cochléaire vont disparaître. Une perte de substance a également été constatée au niveau des colliculi inférieurs chez le furet (Moore, 1992) et le chat (Nishiyama, Hardie, & Shepherd, 2000). Par contre, la surdité n'affecterait pas le développement des structures ultérieures, les patterns de projections sous-corticales vers le cortex auditif primaire étant similaires chez les chats sourds congénitaux et les chats entendants (Heid, Jähn-Siebert, Klinke, Hartmann, & Langner, 1997). Chez l'adulte sourd profond humain, la déprivation sensorielle précoce et prolongée affecterait la taille des neurones du noyau cochléaire jusqu'à 50% inférieure comparativement aux sujets entendants (Moore, Niparko, Miller, & Linthicum, 1994). Ce phénomène s'explique par le fait que les mécanismes de synaptogenèse dépendants de l'expérience auditive ne sont pas mis à l'œuvre dans le cas de la surdité profonde : les synapses non appropriées ne sont pas éliminées et les connections essentielles ne sont pas formées et redistribuées dans l'arborescence dendritique (Kral & Eggermont, 2007). Au niveau cortical (potentiels évoqués auditifs corticaux), l'onde P1, marqueur de la maturité des voies auditives (myélinisation et croissance axonale) est très retardée chez les sujets implantés tardivement (Sharma, Dorman, & Spahr, 2002a) et suggère un ralentissement de la conduction de l'information. De plus la localisation d'apparition de cette onde est modifiée : chez les sujets entendants, elle est générée au niveau du gyrus temporal inférieur et à la jonction du gyrus temporal médian et du sulcus temporal supérieur, tandis qu'en cas de surdité traitée tardivement, elle apparaît dans une zone du cortex temporo-pariétal, le gyrus post-central (Gilley, Sharma, & Dorman, 2008). De plus, chez les enfants implantés tardivement, cette onde n'apparaît que dans l'hémisphère controlatéral à la stimulation, bien qu'une stimulation monaurale soit censée stimuler bilatéralement les cortex auditifs. Ces auteurs émettent l'hypothèse qu'une période de surdité précoce et prolongée pourrait engendrer un dé-couplage des voies auditives. L'apparition de l'onde N1 est un autre marqueur de la maturité corticale. Elle apparaît vers l'âge de 5 ans chez l'enfant entendant et son développement se prolonge jusqu'à l'adolescence. Elle provient de l'activité synaptique

de la couche corticale II et de la partie supérieure de la couche III. Cette onde N1 ne semble pas apparaître chez les enfants implantés tardivement ou tirant peu de bénéfices de leurs prothèses auditives (Eggermont & Ponton, 2003). Cette absence pourrait refléter un arrêt ou une altération de la maturation des couches corticales concernées, dont la maturation se traduit au niveau comportemental par l'habileté à traiter la parole dégradée ou la parole en milieu bruyant. Les couches corticales profondes pourraient suivre une maturation autonome en l'absence d'input auditif, tandis que la maturation des couches plus superficielles est soumise à l'expérience auditive. La plasticité des voies auditives centrales tendrait donc à diminuer avec la durée de la surdité : la dé-afférentation auditive conduit donc à une myélinisation moins importante, moins de fibres projetant vers et des cortex auditifs et/ou un plus grand pruning axonal.

Les structures des cortex auditifs ne semblent pas affectées par les mécanismes de dégénérescence constatées aux étages inférieurs. Cependant, chez les sujets sourds signants (i. e., utilisateurs de la langue des signes) issus de familles sourdes et utilisateurs occasionnels de leurs prothèses auditives, le ratio de substance blanche/grise des gyri temporaux supérieurs est augmenté (Emmorey, Allen, Bruss, Schenker, & Damasio, 2003). Le volume total des gyri de Heschl de la population étudiée n'est pas différent de celui des normo-entendants mais le volume de substance blanche est significativement réduit dans l'hémisphère gauche tandis qu'un plus grand volume de substance grise a été retrouvé dans l'hémisphère droit, différence également imputée à une réduction du volume de matière blanche. La myélinisation et la croissance axonale dans cette structure serait donc également dépendante de l'expérience sensorielle. Les fibres reliant les zones auditives aux zones motrices (faisceau arqué) seraient plus denses chez les sujets entendants. Ces auteurs ont aussi trouvé les volumes des planum temporale légèrement plus importants chez les sujets sourds comparativement aux contrôles entendants. Le volume de substance grise ne semble pas affecté par l'absence d'input sensoriel, ce probablement en raison de l'activation de ces structures par d'autres modalités sensorielles (plasticité cross-modale).

5. 2. Spécialisations cérébrales fonctionnelles et plasticité cross-modale

L'étude de patients sourds signants cérébro-lésés (AVC) a montré d'une part la latéralisation du langage dans l'hémisphère gauche mais aussi que la production et la réception de la langue des signes recrutent des zones analogues à celle des patients entendants. Ainsi, aux lésions de l'aire de Broca, sont associées des difficultés de production de la langue des signes, tandis que les lésions temporales gauches sont responsables de difficultés de compréhension et de jargonaphasie (Hickok, Bellugi, & Klima, 1998 ; voir Campbell, MacSweeney, & Waters, 2008 pour une revue). Ces résultats couplés à ceux de l'imagerie fonctionnelle de production et de réception du langage suggèrent que la zone de Broca et le lobe temporal seraient impliqués dans le langage quelle que soit la modalité linguistique utilisée (signes versus oral). En revanche, l'activation d'autres régions cérébrales apparaît directement liée à la modalité linguistique utilisée, comme les aires visuelles dans la réception en langue des signes. De plus, l'absence d'input auditif empêcherait la spécialisation fonctionnelle de certaines zones, en particulier au niveau du cortex auditif secondaire.

Mc Sweeney et collaborateurs (MacSweeney et al., 2002) ont comparé des adultes sourds signants, des adultes entendants signants et des adultes entendants non signants avec une tâche de compréhension de phrases. Les phrases étaient présentées en langue des signes pour les participants utilisateurs de la langue des signes et de manière audio-visuelle pour les utilisateurs de la langue orale. Les résultats ont mis en évidence des recouvrements

d'activations dans les régions classiquement activées dans le traitement du langage. Cependant, les sourds signants se distinguent des entendants non signants par une implication des gyri occipitaux moyens et lobe pariétal inférieur gauche tandis que les entendants non signants activent bilatéralement les parties postérieures des gyri temporaux supérieurs jusqu'aux gyri de Heschl et le sulcus temporal supérieur droit. Les sourds signants diffèrent des entendants signants (pourtant même modalité linguistique) par un recrutement du gyrus temporal supérieur gauche. En l'absence d'input auditif, les régions auditives sont donc activées en réponse à des signaux visuels. Ces résultats sont confirmés par Pettito et collaborateurs (Pettito et al., 2000) qui ont remarqué la même activation bilatérale des planum temporale à la présentation de signes et de pseudosignes.

Cependant, l'activation des régions auditives ne semble pas limitée à des stimuli visuels linguistiques. Pour mettre ce phénomène en évidence, des adultes sourds congénitaux et des sujets entendants contrôles ont été soumis à une tâche dans laquelle ils devaient suivre le déplacement de points lumineux sur un écran (Finney, Fine, & Dobkins, 2001). L'IRM-f montre que le cortex auditif secondaire droit des sujets sourds est significativement activé ainsi qu'une partie du cortex primaire. Ce pattern d'activation persiste même lorsqu'ils reçoivent l'instruction d'ignorer le déplacement du point lumineux). Une observation plus surprenante a été effectuée chez un sourd congénital qui démontrait des activations bilatérales des cortex temporaux supérieurs en réponse à des vibrations produites par des sons non audibles recueillies au creux de sa main gauche. Ce participant présentait des patterns d'activités cérébrales spécifiques en fonction des fréquences sonores utilisées (Levänen, Jousmäki, & Hari, 1998).

En résumé, la déprivation auditive prolongée produit une dégénérescence des noyaux des voies auditives primaires et affecte les mécanismes de synaptogenèse à tous les niveaux de la conduction et du traitement des informations auditives. La conduction de l'information après réhabilitation de l'audition est ralentie. Au niveau cortical, la maturation des couches superficielles est retardée et affecte négativement le traitement des sons de la parole. Sur le plan fonctionnel, la modalité linguistique utilisée influence l'engagement des gyrus temporaux supérieurs qui sont activés par des signaux non auditifs.

6. Résumé

Le développement langagier cognitif, communicatif de l'enfant sourd est marqué par des facteurs qui relèvent de la déficience sensorielle elle-même et des conséquences du retard de langage. L'absence d'input auditif au cours des 16 premiers mois de la vie (âge moyen du diagnostic de surdité profonde bilatérale en France) conduit donc à une cascade de conséquences qui interagissent. Par son comportement vocal réduit, l'enfant sourd est moins enrôlé dans les conduites d'échanges précoces qui permettent le développement de la communication (compétences pragmatiques) mais aussi sollicitent ses compétences attentionnelles. La maturation neuronale des voies auditives étant dépendante de l'expérience auditive est marquée par une dégénérescence des noyaux des voies auditives primaires, une synaptogenèse imparfaite (réduction des processus de myélinisation, de développement de l'arborescence dendritique, et de la croissance axonale), et, au niveau cortical, par un retard de maturation des couches superficielles impliquées dans des traitements auditifs fins et des patrons électrophysiologiques spécifiques. On assiste à une adaptation fonctionnelle des zones associatives qui sont activées par des signaux transmis par d'autres modalités sensorielles. De plus, les limites technologiques des modes de réadaptation auditive (limitations spectrales en cas d'implant) et/ou lésions spécifiques de la membrane basilaire et limitations des

possibilités d'amplification en cas de prothèses conduisent à un appauvrissement qualitatif du signal sonore transmis. L'apparition du langage suit la réhabilitation de l'audition (prothèses ou implant cochléaire) et est retardée. Les capacités de développement du langage seraient également affectées, se reflétant par une progression annuelle inférieure à un an. Les compétences cognitives liées à l'audition et au langage, comme le traitement séquentiel et la mémoire verbale sont affectés négativement par les troubles langagiers.

Nous avons vu que le traitement médical de la surdité repose sur la suppléance de la perte auditive par des moyens audioprothétiques. Le traitement des conséquences de la surdité est éducative et rééducative. Actuellement, dès que le diagnostic de surdité est posé, une éducation précoce, généralement au domicile de l'enfant, est assurée par une équipe pluridisciplinaire. Elle vise à intervenir sur l'installation des conduites d'échange entre l'enfant et son entourage (communication). Dès que l'audition est réhabilitée, la fonction d'alerte est sollicitée, mobilisant les possibilités attentionnelles indispensables aux mécanismes d'apprentissage. Ces stratégies de sollicitation visent donc à modifier les réponses comportementales des enfants. Elles reposent sur une base théorique fondamentale que sont les mécanismes de plasticité cérébrale. Le chapitre suivant décrit les possibilités d'adaptation du cerveau aux modifications sensorielles et à l'expérience auditive.

Chapitre 4 : Audition et plasticité cérébrale

Si l'on considère sur un plan quantitatif (voire qualitatif) l'expérience auditive comme un continuum, il est alors possible de placer autour d'un point moyen qui représente la population ordinaire, à un extrême les individus évoluant dans un environnement acoustique appauvri, voire inexistant (les sujets sourds sévères et profonds non ou mal réhabilités) et à l'autre extrême, les individus ayant bénéficié d'un environnement acoustique enrichi (les musiciens). Cette dispersion permet d'aborder les effets de chacun des milieux sur l'adaptation cérébrale (plasticité) issue de l'expérience auditive. Nous présenterons dans la première partie de ce chapitre comment la perte de l'audition (surdité profonde acquise ou surdité postlinguale) entraîne des réorganisations cérébrales. Un traitement de plus en plus répandu de cette pathologie est l'implant cochléaire. Les réponses cérébrales à la ré-afférentation auditive seront abordées dans la deuxième partie, en détaillant les études menées chez l'animal puis chez l'humain. Enfin, seront discutées en troisième partie les données concernant les modifications cérébrales structurelles et fonctionnelles, ainsi que leurs répercussions sur la cognition qui sont observées suite à une stimulation auditive riche chez les sujets entendants, comme dans le cas de la pratique musicale.

1. Effets de la dé-afférentation auditive

Nous avons vu dans le chapitre précédent comment s'effectue la maturation des voies et structures nerveuses en l'absence d'input auditif chez les individus sourds prélinguaux. Chez les sujets post-linguaux, des modifications rapides s'effectuent lorsque l'expérience sonore est appauvrie ou abolie. Pantev et collaborateurs (Pantev, Wollbrink, Roberts, Engelen, & Lütkenhöner, 1999) ont testé les effets d'une dé-afférentation fonctionnelle auprès de 10 sujets adultes non musiciens adultes en supprimant la fréquence de 1 kHz dans 3 de leurs CDs préférés. Les sujets devaient écouter cette musique « trouée » pendant un laps de temps de 3 heures par jour. Après 3 jours, la réponse (mesurée en MEG) à 1kHz a diminué de 12,3%, tandis que la réponse à la fréquence contrôle (0,5 kHz) était stable. De nombreuses études menées chez des adultes devenus sourds ont démontré des modifications spécifiques relatives à l'atteinte de la fonction auditive. Par exemple, une lésion focale de la cochlée qui entraîne l'impossibilité physiologique de traiter une fréquence donnée entraîne, au niveau cortical, une expansion des zones dédiées au traitement des fréquences adjacentes à la fréquence manquante. Ainsi, la zone cérébrale dédiée à la fréquence manquante maintient son statut fonctionnel (Dietrich, Nieschalk, Stoll, Rajan, & Pantev, 2001).

Chez les sujets sourds post-linguaux, une coopération cross-modale (auditive et visuelle) s'instaure pour traiter la réception du langage, permettant par exemple une augmentation de la compréhension du langage par la lecture labiale. Les performances en lecture labiale des sujets sourds post-linguaux sont nettement supérieures à celles des contrôles entendants (Rouger et al., 2011). L'utilisation de la lecture labiale resterait très importante, même plusieurs années après l'implantation cochléaire et l'acquisition de bonnes habiletés perceptives (Rouger et al., 2007). Ainsi, dans une tâche de perception phonétique mettant en compétition les modalités visuelles et auditives (McGurk), les réponses des

participants implantés sont plus influencées par l'information visuelle disponible que celles des sujets contrôles entendants (Rouger, Fraysse, Deguine, & Barone, 2008). De même, dans une tâche de lecture labiale (non sonorisée), toutes les aires auditives associatives sont fortement activées (Lee, Truy, Mamou, Sappey-Marinié, & Giraud, 2007), ainsi que la région du sulcus temporal supérieur droit (région vocale). Chez les sujets entendants, cette région répond aux stimuli auditifs et est couplée à la région traitant la reconnaissance des visages dans des tâches d'appariement voix/visage. Il serait possible que cette zone dédiée au traitement des visages s'étende fonctionnellement au traitement des mouvements des lèvres, conduisant à une réorganisation cross-modale du sulcus temporal supérieur droit (désécialisation ; Rouger et al., 2011). L'importance de la plasticité cross-modale prédirait les performances langagières ultérieures en cas de pose d'implant : lorsque les aires auditives associatives sont hypométaboliques au repos, elles demeurent disponibles pour traiter des stimulations auditives. Inversement, une absence d'hypométabolisme indique un recrutement de ces aires par d'autres modalités sensorielles et, en conséquence, une disponibilité pour les stimuli auditifs réduite (Lee et al., 2001).

Enfin, deux stratégies cognitives pour compenser les difficultés et le déclin du traitement phonologique seraient à l'œuvre et corrélées aux performances de perception langagière après implantation. L'une, basée sur l'activation des régions cérébrales ventrales permettrait des patterns d'identification de sons globale et peu précise, et la seconde mettant en jeu le cortex préfrontal dorsolatéral permettrait de meilleures performances auditives (Lazard et al., 2010).

En résumé, la déafférentation auditive chez les adultes conduit à une réorganisation cérébrale fonctionnelle se traduisant par une diminution des réponses neuronales du cortex auditif primaire. D'autre part, une compétition cross-modale s'effectue : les aires auditives associatives et l'aire du traitement vocal sont utilisées pour le traitement des stimuli visuels, permettant de nouveaux traitements cognitifs compensatoires pour percevoir la parole. Dès lors, il est légitime de s'interroger si des mécanismes inverses peuvent s'opérer en cas de ré-afférentation auditive. Cette question est étudiée dans la section suivante.

2. Effets de la ré-afférentation auditive

2. 1. Données chez l'animal

Chez des chats sourds congénitaux précocement implantés, on remarque non seulement une excitabilité des neurones du tronc cérébral (colliculi) et de certains neurones corticaux mais aussi une représentation tonotopique au niveau de ces structures correspondant aux électrodes actives (Fallon, Irvine, & Shepherd, 2009). La résolution temporelle des neurones des colliculi inférieurs est maintenue ou améliorée en fonction de la fréquence de la stimulation (Wollmer et al., 1999). En cas d'implantation précoce, les potentiels évoqués corticaux auditifs sont équivalents à ceux des chats normo-entendants. En revanche, si l'implantation est plus tardive (après 6 mois de vie pour les chats), on remarque une diminution globale d'excitabilité des neurones du cortex auditif primaire, une augmentation substantielle de la latence des réponses des couches profondes et une diminution de l'activité synaptique, suggérant que l'absence d'input auditif à long terme produise un phénomène de dégénérescence (Kral, Hartmann, Tillein, & Heide, 2000).

2. 2. Effets de l'implant cochléaire chez l'adulte sourd post-lingual

A court terme, l'activation de l'implant produit des réponses cérébrales spécifiques. Le niveau de métabolisme du cortex auditif primaire est augmenté, principalement du côté controlatéral à l'implantation (Lazeyras et al., 2002). Giraud et collaborateurs (Giraud, 2001) ont comparé en IRM-f l'organisation fonctionnelle du langage entendu chez 6 adultes sourds post-linguaux implantés (entre 1 et 4 mois après l'activation de l'implant) à celles de contrôles entendants. Les auteurs ont dessiné plusieurs conditions expérimentales : répétition silencieuse de mots et syllabes, dénomination sur présentation auditive et production du mot « OK » indiquant la perception de bruits. Cette procédure permet d'analyser quelles régions sont activées par tous les inputs sonores, celles qui sont activées par des inputs sémantiques (langagiers ou sons de l'environnement), celles qui sont activées pour les inputs uniquement langagiers (syllabes et mots). Les patients implantés réhabilités diffèrent des contrôles par des activations moins spécialisées du cortex temporal supérieur postérieur pour les sons complexes, (environnementaux et langagiers). Les activations diffèrent également au niveau de l'aire de Wernicke, qui répond pour tous les sons chez les patients implantés, suggérant une déspecialisation de cette région classiquement activée pour traiter les sons langagiers. Les patients recrutent davantage que les contrôles le précuneus, probablement afin de constituer une image mentale de l'objet sonore qui aiderait à générer l'étiquette verbale correcte. Il recrute aussi d'avantage le gyrus parahippocampique (interface entre la perception visuelle et l'encodage des stimuli) pour les mots et les syllabes, reflétant les processus mnésiques à l'œuvre pour récupérer les étiquettes verbales. En revanche, les patients activent moins que les contrôles l'aire de Broca dans les tâches de répétition et de dénomination. Le cortex visuel est activé uniquement (mais de façon consistante) chez les patients, dans les tâches de répétition de syllabes et de mots, de même qu'en dénomination, alors que cette activité n'est pas corrélée à une activation des aires correspondant aux mouvements oculaires. L'activation visuelle pourrait résulter d'un couplage visuel lié à l'utilisation de la lecture labiale dans les tâches de compréhension langagière (Giraud, Price, Graham, & Frackowak, 2001). Les sujets sourds post-linguaux développeraient donc des stratégies auditivo-visuelles pour une compréhension bimodale du langage. Green et collaborateurs (Green, Ramsden, Julyan, & Hastings, 2008) ont fait écouter une histoire à 6 sujets adultes dont la compréhension a été vérifiée à l'aide d'un questionnaire. L'effet majeur de l'activation de l'implant cochléaire se manifeste par une plus grande activité corticale dans l'hémisphère controlatéral qu'ipsilatéral à l'implant. La perception de la parole n'est pas latéralisée dans l'hémisphère gauche. Des activations des aires occipitales ont été retrouvées de façon inconstante. Notons toute fois que la nature des tâches utilisées par ces auteurs n'est pas identique.

L'expérience auditive prolongée avec un implant cochléaire induit une augmentation progressive des performances auditives liée à la spécificité des zones cérébrales engagées et à l'amplitude des réponses neuronales. Dans les tâches de lecture labiale (présentation silencieuse), l'activation des aires auditives et du sulcus temporal supérieur droit (aire de reconnaissance vocale) tend à diminuer et l'activation de l'aire de Broca ne diffère plus de celle des normo-entendants. Dans un suivi longitudinal (2 ans) de 2 patients atteints de surdité progressive, Pantev et collaborateurs (Pantev, Dinnesen, Ross, Wollbrink, & Knief, 2006) ont observé des réponses corticales (P1m et N1m) à la présentation d'un son pur de 950 Hz modulé pendant 500 ms à 1050 Hz toutes les 2 secondes. Les localisations des activations temporelles ne diffèrent pas significativement des sujets contrôles entendants. Mais surtout une augmentation des amplitudes des composantes P1m et N1m (composantes influencées par les caractéristiques temporelles des stimuli) a été constatée au cours du suivi. Ceci suggère l'activation d'un plus grand nombre de neurones corticaux et/ou une augmentation de la surface corticale génératrice de ces réponses.

En résumé, immédiatement après la ré-afférentation auditive par implantation cochléaire chez l'adulte présentant une surdité profonde postlinguale, le cortex controlatéral à l'implantation est plus fortement engagé dans le traitement auditif, les zones auditives sont moins (ou dé-) spécialisées dans le traitement des stimuli auditifs (recrutement de l'aire de Wernicke pour les sons de l'environnement), les aires visuelles sont activées par les stimuli auditifs et la zone de Broca est moins recrutée que chez les contrôles. Ces patterns d'activation particuliers tendent à diminuer avec l'expérience prolongée de l'utilisation de l'implant.

Cependant, chez ces patients, le retour à des réponses neuronales « classiques » est influencé par une maturation antérieure des voies auditives centrales non pathologique. Qu'en est-il chez l'enfant dont les voies auditives n'ont jamais véhiculé et traité d'informations auditives ?

2. 3. Effets de l'implant cochléaire chez l'enfant sourd prélingual

Les réponses électrophysiologiques des enfants implantés ont été étudiées. Sharma et collaborateurs (Sharma et al., 2002a) ont remarqué que les latences de l'onde P1 du Potentiel Evoqué Cortical qui reflètent la maturité des voies auditives centrales sont comparables à celles des enfants normo-entendants si l'implantation cochléaire a été effectuée avant l'âge de 3 ans et demi, particulièrement si les enfants sont appariés en terme de durée d'audition fonctionnelle, suggérant un retard de maturation proportionnel à la durée de la surdité (Eggermont & Ponton, 2003). De plus cette onde est générée au niveau du cortex auditif chez les enfants implantés précocement (Gilley et al., 2008). Ces résultats suggèrent que la maturation des couches corticales moyennes (couches III profonde et IV) serait subnormale, tandis que des altérations persistent au niveau des couches plus superficielles (II et III supérieure). Une étude récente utilisant la NIRS compare des enfants le jour de l'activation de leur implant comparés à des enfants dont l'activation a été effective 4 mois plus tôt (Sevy et al., 2010). Les auteurs ont enregistré des paragraphes d'une histoire, d'une durée de 20 secondes chacun, avec un intervalle inter-stimuli de 50 secondes. Les activations corticales des enfants dont les implants venaient d'être activés ont été enregistrées majoritairement dans l'hémisphère ipsilatéral à l'implant (la plupart des enfants avaient été implantés à droite), contrastant avec l'habituelle latéralisation gauche de la perception langagière. Chez les enfants qui avaient une expérience d'utilisation de leur implant supérieure à 4 mois, les activations bilatérales dominaient.

En résumé, l'implantation cochléaire précoce, et donc une stimulation auditive précoce permettent une maturation des voies auditives centrales comparables à celle des enfants normo-entendants. Ces données soulignent l'importance d'un diagnostic et d'un traitement audioprothétique précoces.

Une autre question fondamentale dans la rééducation des enfants sourds congénitaux concerne la nature des stimulations à utiliser. Quelle est la pertinence de l'utilisation de stimulations auditives vs. stimulations multimodales ? Quels sont les effets de leur répétition ? Des éléments de réponse sont fournis par l'étude des effets de l'apprentissage musical chez les musiciens adultes et chez les enfants.

3. Effets de l'environnement enrichi, exemple des musiciens

Tout au long de notre vie, nos expériences auditives, si elles sont répétées vont « s'inscrire » dans l'organisation anatomique et fonctionnelle de notre cerveau. Les travaux pionniers menés chez le macaque (Recanzone, Schreiner, & Merzenich, 1993) ont permis de mettre en évidence qu'un entraînement à la discrimination de fréquences induisait un élargissement de la représentation tonotopique de cette fréquence au niveau du cortex auditif primaire. De même, la précision de la réponse à la fréquence-cible était corrélée à l'élargissement de la cartographie fréquentielle. Les neurones du cortex auditif primaire démontrent une meilleure sensibilité à la fréquence-cible même si l'intensité est diminuée. La simple exposition à un environnement enrichi conduit à une augmentation des réponses corticales et affine le « réglage » (*tuning*) des neurones, chez les animaux jeunes mais aussi chez les animaux âgés (Engineer et al., 2004).

Chez l'humain, une population de choix pour mesurer les effets à long terme des stimulations auditives est celle représentée par les musiciens. En effet, Zatorre et collaborateurs (Zatorre, Chen, & Penhune, 2007) ont décrit la complexité que représente le fait de jouer d'un instrument de musique. Par exemple, pour jouer du violon, le corps entier est impliqué et doit être coordonné aux systèmes sensoriels à un fort degré de synchronie et de précision. Tandis que le bras gauche tient l'instrument, le bras droit fait glisser l'archet, les doigts pressent les cordes, les informations provenant de la perception somatosensorielle de la posture corporelle et des dernières phalanges doivent être constamment intégrées dans l'élaboration gestuelle. Le système auditif analyse la justesse des sons produits et le feedback auditif est utilisé pour maximiser la qualité sonore. Le système visuel analyse la partition et traduit l'écriture musicale en informations pertinentes nécessaires à la production musicale. La mémoire, l'attention et le système émotionnel sont également requis. Les années d'apprentissage et de pratique musicale nécessaires à l'expertise démontrée par les musiciens professionnels font que ces personnes constituent une population idéale pour étudier les effets de l'expertise auditive.

3. 1. Modifications neuroanatomiques

De nombreuses études ont mis en évidence chez les musiciens adultes professionnels, comparativement à des non musiciens, des modifications structurelles au niveau des structures corticales (plasticité) liée à l'expertise auditive. Chez les violonistes, la représentation corticale des 2 derniers doigts de la main gauche est plus vaste (Elbert, Pantev, Wienbruch, Rockstroh, & Taub, 1995). La représentation somatosensorielle des lèvres des trompettistes est plus développée (Pantev et al., 2003). Les musiciens professionnels qui ont débuté précocement l'apprentissage de la musique démontrent une augmentation du volume de substance grise dans le gyrus de Heschl (Schneider et al., 2002) et une asymétrie du planum temporale plus marquée au niveau de l'hémisphère gauche, en particulier si les musiciens présentent une oreille absolue (c'est-à-dire la capacité de situer la hauteur d'un son sans référence auditive préalable; Schlaug, Jäncke, & Huang, 1995 (b)). La pratique musicale modifie également les régions motrices. Par exemple, le gyrus précentral des non musiciens montre généralement une asymétrie en faveur de l'hémisphère gauche ; cette asymétrie est réduite chez les musiciens, dont l'hémisphère droit est d'avantage recruté (Amunts et al., 1997). Comparant les musiciens professionnels, les musiciens amateurs et les non musiciens, (Gaser & Schlaug, 2003) ont remarqué un gradient entre le statut musical et la différence de

densité de substance grise dans les régions perirolandiques, incluant le cortex moteur primaire, les aires somatosensorielles, les cortex prémoteurs, les aires pariétales supérieures et le gyrus inférieur temporal bilatéralement, également au niveau des régions visuelles et du cortex cérébelleux. La pratique musicale favoriserait également l'intégration des informations sensorielles multimodales (Gaser & Schlaug, 2003), ainsi que la communication entre les deux hémisphères cérébraux (corps calleux de taille plus importante chez les musiciens, Lee, Chen, & Schlaug, 2003). La pratique musicale présente également des effets au niveau de structures neurologiques plus périphériques : il existe une corrélation positive entre l'expertise musicale et la taille de l'hémisphère cérébelleux gauche (Musacchia, Strait, & Kraus, 2008; Pantev, Oostenveld, Engelien, Bernhard et al., 1998).

3. 2. Compétences auditives dans le domaine musical

Ces modifications neuroanatomiques s'accompagnent de différences neurofonctionnelles. Dans une tâche d'écoute musicale, les musiciens qui ont l'oreille absolue présentent des patterns d'activation plus importants au niveau de l'hémisphère gauche (cortex auditif secondaire, incluant le planum Temporale et le cortex préfrontal postérieur dorsolatéral) tandis que les activations des non musiciens sont majoritairement localisées dans l'hémisphère droit (Ohnishi et al., 2001). Les musiciens pourraient engager plus de neurones dans des tâches de traitement des sons musicaux et/ou une synchronisation neuronale supérieure : les réponses corticales (ondes N1 et P2 qui reflètent les traitements des caractéristiques acoustiques des sons) sont de 21 à 28% supérieures chez les musiciens comparativement aux non musiciens lorsqu'on leur présente des sons de pianos ou des sons purs de même fréquence (Pantev, Oostenveld, Engelien, Bernhard et al., 1998). L'organisation tonotopique du cortex auditif est également modifiée chez les musiciens : la localisation des réponses du cortex auditif à des sons purs ou complexes est identique chez des sujets non-musiciens tandis qu'elle est différenciée chez les musiciens (Pantev, Oostenveld, Engelien, Bernhard et al., 1998).

Ils présentent, en outre, des habiletés supérieures à celles des musiciens amateurs et des non musiciens pour identifier les timbres des instruments de musique et surtout sont plus cohérents et constants dans leurs réponses (McAdams, Winsberg, Donnadieu, De Soete, & Krimphoff, 1995). Dans une autre étude, Chartrand et Collaborateurs (Chartrand & Belin, 2006) ont comparé les performances de musiciens et de non-musiciens dans deux tâches de discrimination de deux timbres : l'une utilisant des timbres d'instruments de musique, l'autre des voix. Dans la tâche de discrimination instrumentale, les participants devaient décider si des mélodies de trois notes étaient produites avec le même instrument. Pour la tâche de discrimination vocale, il était demandé aux participants de décider si des paires de syllabes étaient émises par le même locuteur. Les musiciens se révélèrent plus performants dans les deux tâches mais un peu plus lents que les non musiciens. Une hypothèse explicative de la supériorité des musiciens serait que la pratique musicale permettrait un meilleur traitement général des timbres, quelle que soit leur catégorie sonore. D'autre part, les musiciens répondraient spécifiquement aux sons de l'instrument avec lequel ils sont entraînés plutôt qu'aux timbres d'autres instruments. Les violonistes, lorsqu'ils sont comparés à des trompettistes, présentent une plus grande activité neuronale au niveau du cortex auditif en réponse à l'écoute de notes jouées au violon et inversement (Pantev, Roberts, Schulz, Engelien, & Ross, 2001). Des résultats complémentaires ont été rapportés en utilisant l'IRM-f chez des flûtistes et des pianistes (Margulis, Mlsna, Uppunda, Parrish, & Wong, 2009). Ces auteurs ont remarqué que l'activation du cortex auditif associatif caractérisant la réponse au timbre était incorporée dans un vaste réseau d'aires corticales relatives au traitement de la

syntaxe (BA44) et aux interactions auditivo-motrices (gyrus précentral). Cependant, des résultats contradictoires ont été mis en évidence dans une étude ultérieure qui comparait les réponses électro physiologiques des violonistes, des pianistes et de non musiciens à l'écoute passive de sons purs, de sons de violon et de sons de piano. Ce sont à la fois les sons du piano et du violon qui provoquaient des réponses plus amples chez les deux populations instrumentalistes (Shahin, Roberts, Pantev, Trainor, & Ross, 2005). Ces auteurs ont également remarqué que les composantes électro physiologiques P2 et P2m des musiciens augmentent avec la complexité spectrale des stimuli. Il est possible toutefois que ces patterns soient des effets non-spécifiques à l'exposition aux sons complexes (Chartrand, Peretz, & Belin, 2008).

Les musiciens sont aussi plus habiles que les non-musiciens pour discriminer les informations fréquentielles (hauteur des notes) et lorsque les musiciens pratiquent la musique classique depuis plus de dix ans, leurs performances sont deux fois supérieures (Micheyl, Delhommeau, Perrot, & Oxenham, 2006). Cette habileté affecte positivement l'encodage automatique du contour et des intervalles. Dans une tâche dans laquelle le contour est altéré par une note finale déviante et dans une tâche dans laquelle l'intervalle entre l'avant-dernière et la dernière note n'est pas respecté, les musiciens répondent par une MMN (onde qui reflète la détection d'un événement inattendu) bilatérale très marquée, tandis que les réponses neuronales des non musiciens sont plus ambiguës (Fujioka, Trainor, Ross, Kakigi, & Pantev, 2004). Les potentiels évoqués enregistrés au niveau du tronc cérébral sont plus amples chez les musiciens, en particulier la réponse des colliculi inférieurs qui interviennent dans le traitement de la fréquence fondamentale des sons et de l'onde delta qui joue un rôle dans l'encodage de l'attaque (Musacchia et al., 2008).

Par ailleurs, les régions actives dans les tâches musicales sont partiellement superposables à celles mises en évidence par les tâches linguistiques, suggérant un réseau commun de régions cérébrales mobilisé pour ces deux domaines (Drury & Van Essen, 1997; Patel, 2008 Tillmann, Koelsch, Escoffier, Bigand, Lalitte, & Friederici, 2006) mais surtout, les musiciens présentent des activations plus fortes dans ces zones (aires de Broca et de Wernicke ; Bangert et al., 2006). Dans les pathologies du développement du langage (SLI), caractérisées par des troubles sévères du traitement syntaxique langagier, les patrons de réponses évoquées neuronales induite par des stimuli musicaux (ERAN et N5) sont perturbés et leur amplitude est corrélées à la sévérité du trouble langagier (Jentschke, Koelsch, Sallat, & Friederici, 2008).

Dès lors, la question de savoir si les musiciens présentaient également des aptitudes particulières pour traiter les sons langagiers a constitué un creuset pour de nouvelles investigations qui nous intéressent particulièrement pour cette thèse.

3. 3. Transfert vers le langage

La musique et le langage sont des systèmes utilisant des paramètres acoustiques comme la hauteur, le rythme et le timbre pour bâtir les informations. Au niveau cognitif, ces systèmes recrutent des compétences analogues de mémoire et d'attention, ainsi que la capacité d'intégrer des éléments acoustiques discrets en flux perceptif cohérent, sous la dépendance de règles syntaxiques spécifiques.

3. 3. 1. Traitement de la prosodie

Plusieurs études ont été menées afin de déterminer si la sensibilité à traiter les modifications de hauteurs (qui constituent une composante de la mélodie) était corrélée à une perception accrue de la prosodie langagière. La prosodie désigne les variations de la

fréquence fondamentale de la voix et renseigne sur la forme grammaticale de la phrase (exclamative, interrogative etc...). Elle fournit en outre des informations sur l'état émotionnel du locuteur. Les musiciens détectent mieux et plus rapidement que les non-musiciens des faibles modifications de hauteur de la dernière syllabe dans leur propre langue (Schön, Magne, & Besson, 2004) mais aussi dans une langue étrangère non parlée et non comprise (Marques, Moreno, Castro, & Besson, 2007). La capacité à apprendre un langage artificiel basé sur des variations de contour telles qu'on les trouve dans le Mandarin peut être prédite à partir du volume de substance grise du Gyrus de Heschl gauche, siège initial de l'encodage de la hauteur (Wong et al., 2008), ainsi que par l'activité bilatérale du lobe temporal supérieur au cours des tâches de classifications sonores (Wong, Perrachione, & Margulis, 2009a). Dans une tâche de reconnaissance émotionnelle sur la base du traitement prosodique dans des phrases sémantiquement neutres et dans des mélodies courtes construites sur les mêmes informations sonores, les musiciens parviennent mieux que les non musiciens à identifier les émotions de base comme la joie, la tristesse, la peur ou la colère. (Thompson, Schellenberg, & Husain, 2004). Oeschlin et collaborateurs (Oeschlin, Meyer, & Jäncke, 2010) ont émis l'hypothèse que les modifications neuronales remarquées chez les musiciens dotés de l'oreille absolue (volume et activations plus importantes du Planum temporale gauche couplées à leurs activations du gyrus frontal inférieur gauche) permettraient un traitement du langage plus efficace au niveau suprasegmental (prosodie) et segmental (phonèmes, syntaxe et éléments lexico-sémantiques). Les auteurs s'attendaient aussi à des patterns d'activations différents en IRM-f dans une tâche d'écoute selon 4 conditions expérimentales : (1) phrases de contenu sémantique et prosodique congruent, (2) phrases non sémantiques mais prosodie respectée, (3) phrases de contenu sémantique congruent mais sans prosodie et (4) phrases non sémantiques et non prosodiques. Les musiciens présentent des activations plus fortes dans les régions sylviennes gauches et du gyrus temporal moyen gauche pour les conditions lexicalisées. En revanche, l'effet d'expertise pour le traitement prosodique se distingue par le moindre degré d'activation bilatérale (légère supériorité hémisphérique droite) des régions auditives primaires (qui traduiraient un traitement plus efficient). L'acuité auditive des musiciens oreille absolue ne se limite donc pas au traitement musical mais s'étend à une notion de segmentation acoustique générale, impliquant les réseaux de traitement du langage.

3. 3. 2. Traitement temporel

Gaab et collaborateurs (Gaab et al., 2006) ont étudié le traitement spectro-temporel rapide. Les participants (20 musiciens et non musiciens) écoutaient des séquences de trois tons variant par leurs intervalles inter-stimuli et devaient les reproduire dans l'ordre. Non seulement les musiciens étaient plus efficaces que les non-musiciens, mais ces traitements impliquaient des réseaux neuronaux plus efficaces chez les musiciens, en particulier ceux qui sont associés avec le traitement du langage, comme l'aire de Broca. Or la rapidité de traitement acoustique est requise dans les aptitudes de traitement phonologique. De tels résultats suggèrent que les musiciens présenteraient de meilleures habiletés à effectuer les traitements phonologiques (Gaab et al., 2006). D'autre part, une corrélation entre les habiletés musicales et les habiletés phonologiques dans l'apprentissage d'une seconde langue a été mise en évidence (Slevc & Miyake, 2006).

Marie et collaborateurs (Marie, Magne, & Besson, 2011) ont demandé à 14 musiciens professionnels de juger la congruence sémantique et/ou métrique de phrases simples. Dans une condition, ils devaient prêter attention au sens (indiquer si le dernier mot de la phrase est congru ou incongru) et dans l'autre condition au rythme (indiquer si la durée de l'avant-dernière syllabe est augmentée ou non). Les résultats mettent en évidence des réponses électro physiologiques (P200, N400, P600) plus amples chez les musiciens, que leur attention soit

portée vers le sens ou vers le rythme. Les musiciens présentent donc une sensibilité aux patterns métriques musicaux mais aussi langagiers. Des structures sous-corticales comme des noyaux du tronc cérébral sont également affectées par l'expertise auditive (Kraus & Nicol, 2010).

3. 4. Autres compétences

Les différentes composantes de la musique décrites ci-dessus donnent au signal une valeur émotionnelle, voire sémantique qui résonnent chacune avec une ou plusieurs compétences mentales générales et non spécifiques au traitement de la musique. Ainsi, le traitement de la hauteur s'appuie sur des capacités perceptives auditives mais aussi sur des habiletés spatiales, le rythme est plus étroitement lié aux habiletés motrices, l'organisation syntaxique semble partager des ressources avec le traitement du langage. L'activité musicale (écoute ou pratique) implique différentes formes de mémoire (implicite, autobiographique, verbale) directement reliées au système émotionnel. La richesse de la structure des stimuli musicaux permet ainsi de stimuler un grand nombre de compétences mentales de manière simultanée, et donc d'améliorer potentiellement à la fois le fonctionnement de chacune et leur coordination. Un effet facilitateur d'une activité musicale sur une compétence non musicale peut être attribué à l'addition ou l'interaction de ces relations entre composantes musicales et compétences mentales générales. Cette section aborde les effets de transfert liés à l'expertise musicale sur les habiletés visuo-spatiales, motrices et mnésiques.

Les musiciens qui présentent l'oreille absolue démontrent de meilleures performances dans une tâche visuo-spatiale (tâche des figures cachées ; Costa-Giomi, Gilmour, Sidell, & Lefebvre, 2001). Dans une autre étude Brochard et collaborateurs (Brochard, Dufour, & Despres, 2004), des participants musiciens ont été comparés à des non musiciens pour localiser un point lumineux par rapport à une ligne de référence présente ou absente. Les musiciens sont plus rapides (temps de réaction de 380 ms pour les musiciens contre 440 ms pour les non musiciens) en particulier pour une ligne de référence verticale. Ils commettent aussi moins d'erreurs. Ces observations s'expliqueraient par le fait que les habiletés spatiales sont impliquées dans le codage de la hauteur des notes. Par exemple, la réponse à deux sons, l'un grave et l'autre aigu, est facilitée si le son aigu correspond à une touche située au-dessus de celle correspondant au son grave. De même, l'écriture de la hauteur des notes sur une portée est spatialement et verticalement organisée.

Les neurosciences ont permis de mettre en évidence la relation entre les aires cérébrales relatives à l'audition et celles de la motricité (Chen, Zatorre, & Penhune, 2006). Les cortex auditifs et moteurs sont reliés par des systèmes de projections réciproques dont la maturation dépend de l'expérience. Chez les musiciens, les cortex moteurs sont activés par l'écoute de pièces musicales connues (Haueisen & Knösche, 2001) mais l'utilisation d'un clavier muet produit des activations des aires auditives primaires et secondaires (Bangert et al., 2006). Un entraînement musical avec composante sensorimotrice (pratique) de courte durée (10 sessions) produit davantage de modifications des représentations auditives (augmentation de la MMN) qu'un entraînement centré sur l'écoute. (Lappe, Herholz, Trainor, & Pantev, 2008). Les aires motrices s'activent chez les non-musiciens qui écoutent un air qu'ils ont été entraînés à jouer mais pas pour d'autres mélodies (Lahav, Saltzman, & Schlaug, 2007). Les habiletés motrices sont plus développées chez les musiciens. L'exercice musical bimanuel par définition entraîne une réduction de l'asymétrie bimanuelle (Jäncke, Schlaug, & Steinmetz, 1997). Cette étude montre également que les pianistes ont de meilleures performances que les musiciens qui pratiquent un instrument à corde dans une tâche de tapping (taper du doigt en rythme avec une stimulation auditive régulière). L'entraînement

moteur musical peut également montrer des effets de transfert en améliorant les performances motrices générales (i. e. non dirigées vers la musique). Par exemple, les musiciens imitent des gestes donnés avec plus de justesse et de finesse que les non musiciens (Spilka, Steele, & Penhune, 2010). La simple écoute de séquences musicales active des régions cérébrales motrices (Brown & Martinez, 2007; Zatorre, Chen, & Penhune, 2007), et la pratique musicale les modifie, y compris à très court terme (Pantev, 2011).

Pour résoudre des fractions qui nécessitent à la fois le maintien des résultats obtenus aux différentes étapes et la poursuite du raisonnement, les musiciens utilisent uniquement leur hémisphère gauche et sollicitent le gyrus fusiforme (structure impliquée dans le traitement des formes visuelles abstraites (Schmithorst & Holland, 2004) suggérant que les musiciens présenteraient des stratégies plus abstraites que visuelles ou verbales. Brandler & Rammsayer (2003) retrouvent également une supériorité des résultats des adultes musiciens à une épreuve de raisonnement.

Analysant les structures cérébrales impliquées en mémoire verbale et dans le traitement musical, Chan et collaborateurs (Chan, Ho, & Cheung, 1998) ont émis l'hypothèse que les musiciens présenteraient une supériorité de leurs performances en mémoire verbale mais pas en mémoire visuelle. Leurs résultats ont confirmé cette hypothèse mais devraient être vérifiés auprès de deux groupes strictement appareillés. Toutefois, des réseaux neuronaux communs ont été mis en évidence récemment pour des tâches de mémoire musicale et verbale (Koelsch & Jentschke, 2008). Chez l'enfant également, la pratique musicale induit des modifications structurelles et fonctionnelles. Une étude transversale menée chez des enfants de 9 à 11 ans montre qu'après 4 ans de pratique en moyenne, les enfants musiciens montrent une augmentation du volume de la substance grise dans la région du cortex sensori-moteur (lié à la pratique motrice) et des régions occipitales (lié à la lecture de partitions), comparativement à des enfants non musiciens (Schlaug, Norton, Overy, & Winner, 2005).

D'autres compétences cognitives sont également stimulées et améliorées par l'apprentissage musical. Les enfants qui ont suivi un apprentissage musical précoce démontrent de meilleures performances que les enfants non musiciens aux épreuves de raisonnement spatial de l'échelle composite de Stanford-Binet (Bilartz, Bruhn, & Olson, 1999) et augmentent leur empan de chiffres (Fujioka, Ross, Kakigi, Pantev, & Trainor, 2006). Chez des enfants de 5 à 7 ans, une augmentation des performances en mathématiques a été remarquée après 7 mois d'apprentissage musical (Gardiner, Fox, Knowles, & Jeffrey, 1996). En testant des groupes d'enfants très homogènes, Schellenberg (2006 ; 2004) a exploré l'hypothèse que la musique développe l'intelligence générale, mesurée à travers le quotient intellectuel (QI, Wechsler, 1991). Il a comparé deux groupes d'enfants qui suivaient, soit des leçons de musique, soit des leçons de théâtre. À la fin de l'apprentissage, le groupe d'enfants ayant suivi un apprentissage musical montrait une augmentation plus importante sur l'échelle globale du QI.

Enfin, les capacités de motricité fine de l'enfant, évaluées par le *Bruinsky-Oseretsky Motor Proficiency Test* sont améliorées après 2 années d'apprentissage du piano (comparativement à un groupe contrôle ne suivant pas cet entraînement, Costa-Giomi, 2005), en particulier pour le subtest de rapidité de la réponse motrice.

Cependant, bon nombre de ces études sont basées sur des corrélations entre les patterns neuronaux et les performances accrues des musiciens et ne permettent pas d'écarter l'hypothèse de prédispositions génétiques entre les groupes de musiciens étudiés et les sujets contrôles. Pour écarter cette possibilité, des études longitudinales chez l'enfant s'avèraient indispensables.

3. 5. Études longitudinales

Une étude longitudinale a été menée par Fujioka et collaborateurs (Fujioka et al., 2006) afin de comparer les réponses neuronales d'enfants, âgés de 4 à 6 ans, entraînés au violon avec la méthode Suzuki à celle d'enfants contrôles appariés. Les enfants sont testés tous les trois mois au cours de la première année d'entraînement. Le matériel utilisé était composé d'un son de violon (440 Hz) et d'un bruit de même fréquence. Des changements significatifs ont été remarqués au fil des observations (MEG) chez les enfants musiciens, en particulier une onde N250 plus ample et plus précoce au niveau de l'hémisphère gauche à l'écoute des sons du violon. De même, après 15 mois d'entraînement musical (une demi-heure de leçon de piano privée par semaine), des enfants non musiciens de 6 ans montrent des changements anatomiques dans les aires auditives et motrices, corrélés avec une amélioration de ces habiletés dirigées vers la musique (Hyde et al., 2009).

Enfin, la pratique instrumentale chez l'enfant (piano ou instrument à corde) induit, après 14 mois d'apprentissage, des différences aux tests de discrimination motrice et mélodique (Gordon PMMA) de même que des différences fonctionnelles dans les tâches de discrimination mélodique et rythmique dans les aires auditives associatives, comparativement à l'éveil musical (Schlaug et al., 2005).

Des effets de transfert de l'apprentissage musical vers d'autres compétences ont aussi été mis en évidence, au niveau langagier d'une part, mais également vers des compétences cognitives générales et au niveau moteur. Deux études ont permis de mettre en évidence les effets de leçons de musique sur des compétences langagières. Moreno et Besson (2006) ont aléatoirement réparti des enfants dans un groupe recevant des leçons de peinture (groupe contrôle) ou dans un groupe recevant des leçons de musique pendant 8 semaines. Ils ont comparé leurs réponses électro physiologiques (ERP) à des incongruités de hauteur portant sur la dernière syllabe d'une phrase avant et après entraînement. Les enfants du groupe de musique ne différaient pas des enfants du groupe contrôle au niveau comportemental, et la condition « incongruité faible » demeurait la plus difficile à réaliser. Cependant, les enfants entraînés avec la musique présentaient des patterns de réponses corticales plus amples (composantes positives tardives) pour les incongruités fortes. Reprenant le même design expérimental, Moreno et collaborateurs (Moreno et al, 2009) ont entraîné des enfants âgés de 8 ans (aléatoirement répartis en groupe peinture et groupe musique) pendant une période de 6 mois. La comparaison des performances comportementales et électro physiologiques avant et après entraînement musical démontrait un net effet de l'apprentissage musical. De plus, les enfants du groupe musical ont davantage progressé en lecture, ce qui suggère un effet sur le développement de représentation phonologiques et de conscience phonémique. Cette interprétation est appuyée par les observations de Anvari et collaborateurs (Anvari, Trainor, Woodside, & Levy, 2002), qui avaient trouvé des corrélations étroites entre les capacités musicales d'enfants de 4 à 6 ans et leurs compétences à diverses tâches de conscience phonologique et de perception du rythme.

4. Comprendre les effets bénéfiques de la musique

L'activité musicale requiert la simultanéité et la séquence de plusieurs tâches, comme la lecture d'un code abstrait (la partition), la planification motrice bimanuelle, l'intégration d'un feed-back multimodal (proprioceptif, auditif, kinesthésique). Elle implique une grande précision gestuelle et métrique. Elle sollicite les processus de mémorisation. Elle modifie l'organisation cérébrale en augmentant le nombre de neurones impliqués dans chacune de ces composantes, favorise leur degré de synchronisation et augmente le nombre et la force des

connexions synaptiques excitatrices et inhibitrices (Habib & Besson, 2008). La musique produit des réactions neurophysiologiques, probablement par l'intermédiaire des émotions qu'elle déclenche. Elle produit une modification du niveau d'éveil qui induirait des conditions favorables au développement de compétences cognitives. Cette hypothèse a été soutenue par Schellenberg et collaborateurs (Schellenberg, 2006; Schellenberg, 2004; Schellenberg & Hallam, 2005; Schellenberg, Takayuki, Hunter, & Sachiko, 2007). Les mécanismes neurophysiologiques sont fortement reliés aux réactions émotionnelles générées par la musique. Leur étude permet de distinguer des effets apaisants ou stimulants de l'écoute musicale. La diminution du taux de cortisol lié à l'état de stress a été observée chez le jeune enfant (Shenfield, Trehub, & Nakata, 2003) et chez l'adulte (Khalfa, Dalla Bella, Simone, Roy, Peretz, & Lupien, 2003). L'écoute d'une musique dynamisante que l'on apprécie fortement et corrélée au « frisson musical » (Blood & Zatorre, 2001) provoque une libération de dopamine (Salimpoor, Benovoy, Larcher, Dagher, & Zatorre, 2011). La musique, formidable vecteur de plasticité cérébrale, agirait également au niveau cellulaire et permettrait la neurogenèse, la régénération et la réparation de neurones et circuits neuronaux via l'ajustement des sécrétion hormonales (cortisol, testostérone et œstrogène) qui sont impliqués dans les processus de plasticité cérébrale (Fukui, 2001) et ses liens avec plusieurs fonctions (motricité, mémoire, langage) ont été exploités à des fins thérapeutiques dans plusieurs pathologies. La section suivante rend compte des études portant sur les effets de la musique sur la rééducation des troubles du langage.

5. Utilisation de la musique en thérapie du langage

Les effets positifs de la musique ont été exploités pour constituer un moyen alternatif de remédiation des troubles du langage développementaux et acquis. Chez des enfants dyslexiques, la reproduction de structures rythmiques (tapping), le traitement auditif rapide et la conscience phonologique (compétences toujours très déficitaires dans cette population) ont été améliorés après 15 semaines d'exercices musicaux, dont le chant (Overy, 2003), de sorte que certains auteurs recommandent la pratique musicale chez les enfants dyslexiques (Gaab et al., 2006). La musique permettrait aussi un meilleur contrôle des mouvements bucco-faciaux (Thaut, McIntosh, McIntosh, & Hoemberg, 2001). La Melodic Intonation therapy (MIT) exploite cet aspect auprès des patients qui souffrent de réduction psycholinguistique (aphasie de Broca). Le chant à l'unisson améliore la répétition de phrases (Racette, Bard, & Peretz, 2006). La synchronisation avec un modèle pourrait réactiver la boucle audio-phonatoire défaillante chez ces patients (Warren, Wise, & Warren, 2005). Il est également possible que cette compétence soit liée à l'activation de neurones miroirs intervenant dans la perception et la compréhension des actions motrices d'autrui. Ces neurones miroirs sont sollicités dans les activités musicales (Lahav et al., 2007).

6. Résumé

L'étude neuroanatomique et neurofonctionnelle des structures cérébrales des musiciens reflète une adaptation des structures cérébrales aux spécificités des instruments pratiqués au niveau des aires somatosensorielles, auditives et du corps calleux. La pratique musicale active simultanément et optimise le fonctionnement d'un grand nombre d'aires cérébrales qui sont également impliquées dans d'autres fonctionnements cognitifs, comme la mémoire, l'organisation visuo-spatiale et le langage. Les musiciens présentent des performances, dans ces domaines, supérieures à celles des non-musiciens. Des études longitudinales menées chez

les enfants ont permis de démontrer que les modifications des réponses neuronales apparaissent rapidement et sont corrélées à l'augmentation de leurs performances auditives.

L'ensemble de ces résultats permet de nourrir notre réflexion concernant la prise en charge rééducative des enfants sourds congénitaux. D'une part, sous l'effet des stimulations auditives, les voies auditives démontrent une plasticité permettant un meilleur traitement des informations auditives. D'autre part, la richesse acoustique, comme celle de la musique, active un plus large réseau neuronal également sollicité dans le traitement d'autres matériaux auditifs comme les sons du langage, favorisant ainsi leur traitement. De plus, les aires auditives étant interconnectées aux aires motrices, l'adjonction d'une composante motrice permet d'augmenter les réponses électrophysiologiques au niveau des aires auditives (Lappe et al., 2008). Enfin, les stimuli auditifs, en particulier la musique, activent les réseaux neuronaux du traitement des émotions. Nous soutenons donc qu'une éducation auditive sur la combinaison de ces trois composantes que sont l'audition, la motricité et l'émotion devrait produire un effet stimulateur maximal.

Le chapitre suivant présente et discute les méthodes actuellement utilisées en France ainsi que divers programmes de rééducation auditives testés chez des adultes sourds, des enfants présentant des troubles du traitement auditif et des enfants sourds.

Chapitre 5 : Méthodes et programmes d'éducation auditive

L'éducation auditive a pour objectif d'apprendre au sujet à écouter et à construire ses propres points de repère parmi tous les bruits de la vie quotidienne qui lui parviennent, y compris les voix. La perception des bruits est en effet possible, même chez les sujets sourds profonds, dès la réhabilitation du transfert de l'onde sonore. En revanche, entendre ces sons et ces bruits ne signifie pas la possibilité d'y donner sens. L'éducation auditive chez les enfants sourds consiste à stimuler les restes auditifs dans l'objectif de (re-)découvrir et s'approprier le monde sonore environnant, de puiser dans les perceptions sonores les informations pertinentes susceptibles à terme de décoder la chaîne du langage oral. L'éducation auditive est la plupart du temps pratiquée de façon clinique, c'est-à-dire par l'adaptation du matériel et des tâches utilisés à la singularité du patient.

Nous allons présenter dans cette partie les méthodes de longue durée utilisées en France pour éduquer l'audition des enfants sourds. Nous relaterons ensuite les différents programmes de plus courte durée développés auprès d'adultes, et d'enfants, leurs avantages ainsi que leurs limites.

1. Les méthodes d'éducation auditive

La littérature française dans le domaine de la prise en charge des déficiences auditives de l'enfant fait état de deux courants théoriques et pédagogiques : la méthode Borel-Maisonny d'une part, et la méthode Verbo-tonale d'autre part. Dans la méthode Borel-Maisonny, l'éducation auditive constitue un volet de la prise en charge globale et pluridisciplinaire. La rééducation comporte ainsi des séances en groupe et des séances individuelles d'éducation auditive, langage, articulation, psychomotricité. La méthode verbo-tonale ne conçoit pas l'éducation auditive en tant que phénomène auditif mais dans un acte de parole. Ces deux méthodes ont vu le jour dans les années 1950 et sont toujours utilisées aujourd'hui. Le déroulement temporel de l'une et l'autre approche s'étale sur de nombreuses années (généralement jusqu'à l'adolescence).

1. 1. La méthode Borel-Maisonny

Cette méthode suit une progression rigoureuse mais adaptée au profil clinique de chaque individu. Le premier stade a pour objectif l'émergence et la maîtrise de la réaction d'alerte qui permet à l'enfant de comprendre qu'un événement vient de se produire dans son environnement. Elle est entraînée avec des jeux auditivo-moteurs, comme danser ou mouvoir son corps lorsque de la musique est diffusée et stopper les mouvements lorsque la musique est arrêtée. Le matériel sonore utilisé est varié : musique, bruits de l'environnement, voix et bruits du corps (toux, éternuements). Lorsque la fonction d'alerte est obtenue et fiable, deux

opérations cognitives sont ensuite entraînées chez les enfants : la discrimination et l'identification.

Pour l'entraînement de la discrimination, l'enfant est soumis à des situations sonores identiques ou différentes. La première étape a pour objectif l'acquisition du concept « pareil/différent ». Les enfants sont invités à des réponses corporelles adaptées aux stimuli, comme une marche lente ou rapide en fonction du tempo. Lors de la seconde étape, la discrimination acoustique est matérialisée par une représentation de plus en plus symbolisée (ex : flèche ascendante pour une gamme ascendante et flèche descendante pour une gamme descendante).

Dans l'entraînement de l'identification, la tâche est d'apparier un son entendu à son image, ou encore à le dénommer. L'identification est travaillée d'abord en liste fermée (sans intrus) puis en liste ouverte (choix multiple). La désignation ou dénomination en liste ouverte s'appuie sur l'existence d'un lexique auditif.

Pour ces 2 opérations de discrimination et d'identification, le matériel sonore utilisé est d'abord holistique et fortement contrasté puis des traits acoustiques particuliers seront abordés comme le timbre, la hauteur, l'intensité, la durée. Dès que les paramètres acoustiques sont correctement et fiablement discriminés et identifiés, les sons langagiers (phonèmes vocaliques puis consonantiques) sont introduits dans l'objectif de soutenir le développement de la conscience phonologique et/ou la correction de l'articulation. La progression implique des oppositions vocaliques isolées, au départ très différenciées par leur mode articulaire et leurs composantes fréquentielles, puis de plus en plus proches. Les consonnes sont introduites ensuite. Les oppositions portent également sur leurs caractéristiques acoustiques et articulaires (fricatives vs occlusives, voisées vs non voisées etc....). La progression intervient dans la longueur du matériel à discriminer et/ou identifier (syllabes, mots unisyllabiques, plurisyllabiques) de même que dans la position du phonème dans le mot (position initiale, médiane ou finale). L'étape ultime de l'éducation auditive de la parole s'effectue à l'aide du téléphone qui filtre certains indices spectraux.

Borel-Maisonny a également créé, à l'usage des dyslexiques, des signes très iconiques pour chacun des 36 phonèmes du français. Par exemple, le phonème [a], ouverture de la main, suggère le degré d'aperture de la bouche. Le [z] est représenté par un rapide mouvement de droite à gauche de l'index, rappelant le vol de l'abeille. Ces gestes sont effectués pour soutenir la perception des phonèmes difficiles pour les enfants. Combinés séquentiellement, ils permettent de signaler l'ordre d'apparition des sons dans des syllabes. L'utilisation des gestes Borel-Maisonny est toutefois inconstante dans la prise en charge des enfants sourds.

Nous observons plusieurs limites théoriques à cette approche. D'une part, la plasticité neuro-cognitive est liée au type de tâches effectuées. D'autre part, la perception auditive repose sur la simultanéité et la séquentialité de plusieurs opérations cognitives. Nous questionnons donc quelle adaptation neuronale une stimulation de deux opérations cognitives (discrimination et identification) de bas niveau de traitement peut produire. Sont-elles suffisantes pour permettre une généralisation ou un transfert d'apprentissage ? Les sons sont fragmentés selon leurs paramètres acoustiques qui sont « travaillés » systématiquement. Or, les paramètres acoustiques isolés n'existent pas, ils font nécessairement partie d'un son. Nous interrogeons également sur le type de représentations auditives construites par les enfants à partir de paramètres fragmentés. L'activité corporelle (au cours des phases initiales de la prise en charge) est subordonnée à la perception et à la représentation des caractéristiques acoustiques isolées de l'input sonore que l'enfant acquiert par apprentissage. La motricité est peu utilisée à des fins de production sonore. Dans un deuxième temps, les gestes phonétiques symboliques soutiennent perception et/ou production phonétique.

1. 2. La Méthode verbo-tonale

La méthode verbo-tonale (Ferard, 2006) a été conçue et élaborée en 1954 pour l'apprentissage des langues étrangères par le Professeur Guberina à Zagreb qui avait constaté chez ses étudiants (entendants) des difficultés, voire l'impossibilité, de discriminer des phonèmes appartenant aux langues qu'ils apprenaient. Elle a été adaptée à l'enfant sourd dans les années 60. Cette méthode se veut « naturelle » c'est-à-dire que son fondement principal est de permettre à l'enfant sourd de traverser les mêmes stades d'acquisition du langage que l'enfant entendant, ce qui est normalement entravé par la surdité : imprégnation de sons, de mots que l'enfant va reproduire par imitation. La signification de ces productions dépend de la réponse de l'entourage.

L'objectif principal de la méthode verbo-tonale est de développer des capacités fonctionnelles des zones non atteintes pour permettre la réception et la production de la parole. Les sujets sourds profonds présentent généralement des possibilités perceptives (même réduites) dans les zones fréquentielles basses appartenant cependant au champ dynamique de la perception de la parole, susceptibles de fournir des renseignements rythmiques et intonatifs. L'ensemble du système perceptif est sollicité car tous les organes sensoriels interviennent dans la perception de la parole : l'organe vestibulaire (qui participe au traitement fréquentiel des sons et renseigne sur la position du corps dans l'espace) et la voie somatosensorielle (perception vibrotactile de paramètres acoustiques comme hauteur de la fréquence fondamentale, variations de durée et d'intensité). L'enfant sourd est donc stimulé de manière multisensorielle.

Afin d'identifier ces zones de perception non atteintes, l'audiométrie clinique est complétée par une audiométrie verbo-tonale dont l'objectif est d'évaluer le champ optimal du sujet (zone de champ auditif dans laquelle la sensibilité à la parole est la plus fine). L'audiométrie verbo-tonale découle des travaux de Guberina qui a mis en évidence que les phonèmes vocaliques et consonantiques sont plus facilement identifiés s'ils sont présentés dans des bandes d'octaves spécifiques (les optimales). Les réponses des sujets à des séries de logatomes filtrés sur la bande passante de l'octave qui leur est spécifique (verbo) permettent d'obtenir la sensibilité à la parole en fonction des fréquences (tonal). L'évaluation couvre les fréquences de 269 à 11313 Hz.

La supériorité de scores en audiométrie verbo-tonale (vs audiométrie tonale classique) permet de déterminer dans quelle zone fréquentielle la perception de la parole est la meilleure (optimale).

Une fois cette évaluation effectuée, l'éducation auditive individuelle chez les enfants porteurs de prothèses auditives est réalisée à l'aide d'un matériel spécifique, le SUVAG, amplificateur qui permet d'amplifier sélectivement à l'aide de filtres passe-bas et passe-haut, les bandes fréquentielles du champ optimal de chaque individu afin de l'élargir progressivement. La partie électronique de cet appareil est capable de traiter les signaux infrasonores (à partir de 1Hz). La bande passante des micros et casques est bien sûr adaptée à cette caractéristique. L'utilisation du vibreur est essentielle au début de la prise en charge (vibreur tactile ou plancher vibrant) permettant par la conduction osseuse la perception de fréquences non amplifiées. Le SUVAG n'est pas utilisé chez les enfants implantés en raison des réglages spécifiques de chaque électrode.

La méthode verbo-tonale met en œuvre la participation corporelle comme médiateur de l'apprentissage de la parole par des activités particulières : la rythmique phonétique décomposée en stimulations rythmiques corporelles et stimulations musicales. Les fondements des stimulations de rythmiques corporelles reposent sur la synchronisation entre la perception auditive et l'action : l'enfant est amené à écouter les sons qu'il produit par tous les canaux de son corps (activation de la boucle audio-phonatoire). Le mouvement corporel

est utilisé pour parvenir à une bonne régulation tonique indispensable à la production de la parole, la recherche de la maîtrise tonique se faisant par des activités de polysensorialité sonore. L'affectivité en tant qu'élément fondamental de la communication est également favorisée. Les traits caractéristiques des sons ont été analysés selon les paramètres inhérents à une gestuelle optimale pour la prononciation des phonèmes (macromotricité), comme un mouvement tendu et rapide pour le phonème [p], tandis que le mouvement correspondant au [b] sera beaucoup plus relâché, plus long et allant vers le bas, favorisant la micromotricité (articulation). La rythmique phonétique permet également la perception de la parole de façon polysensorielle par la voie kinesthésique (proprioception), par la voie visuelle (lecture corporelle), par la voie tactile (plancher vibrant) et par la voie auditive. La reconnaissance auditive est travaillée sans lecture labiale. Les composantes rythmiques et intonatives du langage sont stimulées par la rythmique musicale. Des comptines sont créées en respectant une progression phonétique adaptée à l'audiométrie optimale de l'enfant. Les rythmes des comptines correspondent à la durée des phonèmes qui la composent (rapide pour les consonnes brèves). Le mouvement est subordonné au rythme musical, accompagne sa durée et l'intonation de la composition et s'affinent au fil du temps. Les comptines, parlées ou chantées sont destinées à affiner la production de la parole.

Le point fort de cette méthode réside dans le fait que le couplage perceptivo-moteur est central dès le début de la prise en charge. C'est par son action sur l'environnement que l'enfant va percevoir les sons. Par la rythmique phonétique, l'activité corporelle permet d'incarner les caractéristiques de la production phonétique pour construire des représentations phonétiques polysensorielles. Cependant, l'objectif de production de la parole restreint l'utilisation de l'audition et permet peu le développement d'un lexique auditif écologique nécessaire et adapté à l'environnement. Cette méthode est très coûteuse en temps, de 2 à 3 heures quotidienne.

2. Les aides visuelles

Le langage parlé complété (LPC) est un système manuel qui complète la lecture labiale pour permettre une perception visuelle complète, en temps réel, de la parole (Cornett, 1967). Il est utilisé par un locuteur en même temps qu'il s'adresse verbalement à une personne sourde. Le principe consiste à fournir une information sur la syllabe (clé) en combinant une configuration manuelle (codage des consonnes) et une localisation manuelle par rapport au visage (codage des voyelles) associées aux mouvements buccaux. Ce système permet de contourner les difficultés produites par les sosies labiaux. Par exemple, la configuration pouce écarté + autres doigts collés, main en regard de l'oreille peut coder les syllabes suivantes : [ma – mo – me – ta – to – te – fa – fo – fe]. Pour chacun de ces phonèmes, les fenêtres labiales sont différentes. En revanche pour [ma] et [ba] qui partagent la même image labiale, la configuration manuelle sera différente.

Utilisé précocement dans le milieu familial (impliquant la formation des membres de la famille), le LPC apporte une aide considérable à la perception de la parole et soutient le développement de représentations phonologiques sophistiquées. Les enfants éduqués avec LPC développent des habiletés de jugement de similarité et de production des rimes, meilleur que celui des enfants qui ne sont pas éduqués à l'aide de cette technique (Charlier & Leybaert, 2000. Leybaert & Charlier, 1996). L'utilisation du LPC affecte positivement l'acquisition de la lecture et de l'orthographe (Leybaert, 2000).

3. Les programmes d'éducation auditive

Le développement de l'informatique et des jeux vidéo a permis de mettre au point de nouvelles formes d'intervention et de remédiation auprès de personnes présentant des pathologies du traitement auditif, développementales ou acquises. La construction de programmes d'entraînement auditif entraîne la considération de plusieurs facteurs, comme la complexité des tâches, la durée et la fréquence de l'entraînement, la procédure d'apprentissage. La question de savoir si la complexité des tâches à entraîner joue un rôle dans un transfert d'apprentissage peut être considérée en fonction du coût cérébral impliqué dans le traitement. Alors que le traitement des tâches simples comme la discrimination de 2 tons purs requière peu de structures cérébrales, celui des tâches complexes comme la discrimination de la parole dans le bruit implique de nombreux réseaux neuronaux. Leur entraînement est donc susceptible de produire davantage de plasticité cérébrale. La durée et la fréquence de l'entraînement sont liées à la complexité de la tâche, par exemple Wright & Sabin (2007) ont remarqué que le développement d'aptitudes de discrimination fréquentielle requière davantage d'entraînement que celles de discrimination temporelle chez les adultes implantés. Une exposition de quelques heures à un stimulus suffit pour que des modifications de réponses neuronales soient enregistrées mais sont également rapidement réversibles (Pantev, Wollbrink, Roberts, & Engelien, 1999). Enfin, bien que les performances de réception du langage des adultes sourds post-linguaux augmentent « spontanément » au cours des mois suivant l'activation de l'implant (exposition « passive ») l'engagement actif des patients dans des programmes d'entraînement couplé à un feedback produit des effets plus prononcés (Fu & Galvin, 2008). Chez les enfants, les exercices et les stimuli doivent être variés afin de maintenir leur motivation (Most & Aviner, 2009). Globalement, les programmes d'éducation diffèrent des méthodes d'éducation auditive par un allègement des contraintes : leur durée d'utilisation beaucoup plus courte (maximum quelques mois) et un entraînement généralement réalisé au domicile.

3. 1. Programme de rééducation des troubles du développement du langage

Les difficultés d'apprentissage du langage des enfants classés sous l'étiquette nosographique « troubles sévères d'acquisition du langage » résulteraient pour Tallal, 1990 d'un trouble spécifique du traitement séquentiel de la structure spectro-temporelle de l'input sonore (hypothèse du déficit du traitement temporel rapide). Cette hypothèse a conduit l'auteur et son équipe (Tallal et al, 1996) à mettre au point un programme pionnier d'entraînement informatisé : FastForWord-Language (Scientific Learning Corporation, 1998). Le principe de base consistait à entraîner les enfants 3 heures par jour, 5 jours par semaine pendant 4 semaines un signal acoustique et langagier modifié (allongement temporel du signal). La progression de l'entraînement était assurée par une réduction progressive de cet allongement. Dans leur première étude, les auteurs ont entraîné 7 enfants, âgés de 5 à 9 ans, présentant des troubles d'apprentissage du langage associés à des difficultés de lecture. Sur la durée de la période d'entraînement, les enfants recevaient en plus huit autres exercices langagiers en séances individuelles avec des orthophonistes et une à deux heures quotidienne d'écoute d'histoires à la maison. Les auteurs ont rapporté qu'à la fin de cet entraînement, les enfants avaient significativement augmenté leurs scores de discrimination en parole ainsi que leur compréhension langagière. Par contre, cette étude comporte certaines limites (l'absence de groupe contrôle). De plus, l'entraînement comportant plusieurs types d'exercices (écoute du signal modifié, séances d'orthophonie et écoute quotidienne d'histoire), il est impossible de spécifier à quel type d'exercice les progrès sont dus.

La même équipe de chercheurs (Merzenich et al., 1996) a mené une seconde étude avec une cohorte de 22 enfants présentant des troubles sévères d'acquisition du langage, répartie en deux groupes appariés en âge et en niveaux de performances langagières et Q.I. non verbal. Le premier groupe a reçu le protocole Fast ForWord précédemment décrit tandis que le deuxième groupe a été entraîné avec du langage non modifié (incluant les histoires à écouter à la maison comme le premier groupe) et des jeux vidéos au lieu de séances d'orthophonie. Les enfants des 2 groupes ont démontré des progrès consécutifs à l'entraînement reçu avec toutefois un avantage pour le groupe Fast ForWord dans les mesures de traitement temporel, la discrimination du langage et la compréhension grammaticale.

Des études ultérieures utilisant le programme Fast ForWord mais des méthodologies différentes n'ont pas répliqué ces résultats (Cohen et al., 2005; Gillam et al., 2008). Dans l'étude de Cohen et collaborateurs (Cohen et al. 2005), les enfants ont été entraînés chez eux, supervisés par leurs parents. Dans l'étude de Gillam et collaborateurs (Gillam, 2008), l'échantillon d'enfants a été divisé en quatre groupes, tous entraînés activement avec des protocoles différents. Dans ces deux études, le groupe Fast ForWord n'a pas progressé davantage que les autres groupes.

Chez les enfants dyslexiques, différents programmes d'entraînement auditifs ont été étudiés et ont rapporté des modifications des mesures comportementales. Utilisant uniquement des tâches auditives, Schäffler et collaborateurs (Schäffler, Sonntag, Hartnegg, & Fischer, 2004) ont entraîné un groupe de 140 enfants dyslexiques quotidiennement pendant 10 à 15 minutes à l'aide d'un matériel portable et la durée de l'entraînement pouvait être doublée en fonction des performances obtenues. L'entraînement portait sur les discriminations d'intensité, de fréquence, de détection d'interruption, de jugement de durée (entraînement monaural) et de latéralisation auditive. Le post-test démontrait que près de 80% des enfants avaient amélioré leurs scores pour chacune des tâches entraînées. Mais surtout ces gains perceptifs étaient accompagnés d'une augmentation significative en discrimination phonologique et en orthographe. A noter toutefois qu'un groupe apparié qui était entraîné à des tâches visuelles a également démontré une augmentation modérée des performances phonétiques et orthographiques.

D'autres études ont se sont attachées à vérifier les modifications de réponses cérébrales liées à un entraînement auditif. Les effets du programme FastForWord ont été testés chez des enfants dyslexiques. Cet entraînement a produit non seulement des modifications comportementales mais également une augmentation significative de l'activité métabolique de la région temporo-pariétale gauche (région du langage, Temple et al., 2003).

L'intérêt de l'utilisation de matériel non verbal pour la rééducation de troubles du développement du langage a été évalué auprès d'enfants de 7 ans, souffrant de déficits en lecture (Kujala et al., 2001). La tâche consistait en un appariement de patrons audio-visuels : les enfants entendaient des séries de patrons de sons non verbaux qui variaient en hauteur tonale, durée et intensité et devaient les apparier à des patrons visuels correspondants. L'entraînement était dispensé à raison de 2 séances de 10 minutes hebdomadaires pendant 7 semaines. Après entraînement une modification des mesures comportementales (amélioration de la vitesse et précision de lecture) et une amélioration des mesures électrophysiologiques (amplitude et latence de la MMN) a été constatée.

Enfin, un tiers des enfants qui présentent des troubles d'apprentissage du langage présentent des déficits d'encodage des sons langagiers mais pas des sons non langagiers au niveau du tronc cérébral (voir Johnson, Nicol, & Kraus, 2005 pour une revue). Ces déficits ont été mis en évidence à l'aide des Potentiels Evoqués Auditifs Précoces qui incluent à la fois des composantes transitoires (pics I à V) et la Frequency Following Response (FFR) qui se verrouille sur les cycles acoustiques individuels présents dans le stimulus. La différenciation des réponses évoquées par des consonnes différentes est corrélée avec des performances à des

tests de lecture, de conscience phonologique et de perception de la parole dans le bruit (Hornickel, Skoe, Nicol, Zecker, & Kraus, 2009). Le déficit d'encodage au niveau du tronc cérébral pourrait rendre compte d'une représentation imprécise des caractéristiques segmentales et suprasegmentales langagières au niveau des cortex auditifs, ce qui expliquerait l'altération de la MMN (Kraus et al., 1996) ou des anomalies de l'onde N1 (Helenius, Salmelin, Richardson, Leinonen, & Lyytinen, 2002). Hayes et collaborateurs (Hayes, Warrier, Nicol, Zecker, & Kraus, 2003) ont évalué les effets du programme Earobics (Morrison, 1998) chez 27 enfants âgés de 8 ans à 11 ans et 8 mois en recueillant leurs réponses comportementales et électrophysiologiques. L'entraînement comporte des jeux audiovisuels qui se déroulent soit en ambiance calme, soit en ambiance bruyante et stimulent la discrimination phonétique, la mémoire, le séquençage et l'attention auditive ainsi que des jeux de rime et des jeux sonores variés. Un feedback est renvoyé par modalité visuelle et auditive après chaque essai. Le passage au niveau supérieur n'est possible qu'en cas de succès total. Suite à l'entraînement, les réponses corticales recueillies dans le calme (diminution de l'amplitude P1N2 et de la latence de N2) ont montré un patron accéléré de maturation les réponses corticales recueillies dans le bruit (augmentation de l'amplitude P2N2) se sont améliorées et sont devenues plus résistantes aux effets négatifs du bruit. Les auteurs n'ont pas constaté de modifications dans les réponses enregistrées au niveau du tronc cérébral. Cette plasticité corticale était également accompagnée d'améliorations comportementales comme une augmentation des performances en conscience phonologique.

3. 2. Rééducation des troubles centraux de l'audition

Il a été mis au point en Allemagne un programme (Hesse, Nelting, Nohrmann, Laubert, & Ptok, 2001) testé chez des enfants présentant des troubles centraux de l'audition. Dans les cas sévères ces patients ne diffèrent des sujets sourds que par l'intégrité des organes auditifs périphériques. Les auteurs ont entraîné 34 enfants âgés de 7 à 12 ans (moyenne 9 ; 9 ans) pendant une période d'environ 6 mois. L'entraînement auditif portait sur la fonction d'alerte, la détection de silences ou des modifications rythmiques, la discrimination de hauteur et intensité, la localisation sonore. D'autres tâches utilisaient du matériel plus langagier comme la discrimination phonétique ou syllabique. Ecoute musicale et utilisation d'instruments ont également été entraînées. Le programme portait également sur la mise en place et le développement de stratégies métalinguistiques et de stratégies métacognitives. Les effets de l'entraînement se sont manifestés par une diminution du nombre d'erreurs au post-test et une augmentation des performances aux tests psycholinguistiques. Cependant, nous ne savons pas le nombre de sessions d'entraînement, la durée et l'intervalle entre chaque séance ne sont pas communiqués.

3. 3. Programmes de stimulations des troubles perceptifs des sujets sourds

L'implant cochléaire délivre un signal acoustique très différent du signal acoustique naturel, l'apprentissage « passif » lié au temps d'utilisation de l'implant n'engage pas toujours pleinement les capacités des patients à traiter efficacement les nouvelles informations acoustiques. Ainsi, les adultes sourds post-linguaux démontrent une adaptation variable à ce nouvel input auditif. En revanche, un entraînement actif permettrait d'exploiter les capacités de plasticité auditive et faciliterait l'apprentissage des nouveaux patrons acoustiques. Plusieurs programmes d'éducation auditive ont ainsi été mis au point (voir Fu & Galvin, 2008 pour une revue) et les études suivantes ont évalué l'évolution des résultats comportementaux.

Certains programmes ciblent des tâches spécifiques, par exemple, l'entraînement à discriminer une modulation d'amplitude à une fréquence de 150 Hz (Fitzgerald & Wright, 2005) mais ne produisent pas d'effet de généralisation au traitement d'autres fréquences. Dans l'étude de Fu et collaborateurs (Fu, Galvin, Wang, & Nogaki, 2005), un programme d'entraînement, le CAST program (Computer-Assisted-Speech-Training) a été testé avec 10 sujets sourds post-linguaux. Le programme est basé sur l'entraînement à la discrimination de contrastes phonétiques de plus en plus fins dans des mots signifiants ou des logatomes. L'entraînement s'étalait sur 10 semaines à raison d'une heure quotidienne, cinq jours par semaine. Un feedback permettait aux participants de valider leurs réponses. Les effets sont été très variables selon les participants mais globalement, le groupe a évolué dans la reconnaissance vocalique, consonantique et de phrases (Fu et al., 2005). A nouveau, l'absence de groupe contrôle ne nous permet cependant pas de déterminer la spécificité de cet entraînement sur les performances observées en post-test. Une étude exploratoire a été menée auprès de 3 enfants, un adolescent et un adulte, tous sourds prélinguaux. Le programme d'entraînement portait sur des discriminations de voyelles synthétisées ou « naturelles », se déroulait à raison d'une séance de 50 minutes hebdomadaires pendant 10 semaines. Ce sont les enfants qui ont montré les changements les plus significatifs (Dawson & Clark, 1997).

Pour certains utilisateurs d'implant cochléaire, l'intelligibilité des messages téléphoniques est très satisfaisante, mais il existe une grande variabilité des performances (Fu & Galvin, 2006). Dans une étude pilote, ces auteurs ont entraîné un sujet sourd implanté à reconnaître des consonnes modifiées avec des filtres passe-haut et passe-bas de sorte à simuler la bande passante téléphonique. L'entraînement était mené pendant 1 heure par jour, 5 jours par semaine au cours de 2 semaines consécutives. Des progrès notables ont été réalisés au niveau consonantique, généralisés à une meilleure compréhension des phrases entendues au téléphone. Notons que les auteurs ont utilisé la même base-line et qu'un effet test-retest intervient probablement dans ces résultats.

Le programme d'entraînement CAST a également été testé chez 10 enfants chinois (7 porteurs d'un implant et 3 porteurs d'une prothèse auditive). L'objectif était d'améliorer la perception des voyelles, des consonnes mais aussi des tons qui ont une valeur sémantique. Les enfants ont progressé significativement dans les trois domaines entraînés. Le maintien des performances a été vérifié régulièrement pendant 8 semaines après l'arrêt de l'entraînement (Wu et al., 2007).

D'autres programmes ont eu pour objectif d'améliorer la perception et la qualité de l'écoute musicale. La perception du timbre (attribut de la sensation auditive qui permet de juger si deux sons de mêmes fréquence et intensité sont différents) est multidimensionnelle et la contribution des composantes spectrales est importante (Samson, Zatorre, & Ramsay, 1997). Cette dimension est fortement limitée par la faible résolution spectrale de l'implant cochléaire. Gfeller et collaborateurs (Gfeller et al., 2002) ont mesuré les effets d'un entraînement auditif portant sur des discriminations de timbres musicaux chez 11 adultes sourds post-linguaux et implantés. Les participants recevaient 48 leçons de musique (4 par semaine pendant 12 semaines). La progression était basée sur les discriminations de plus en plus fines de familles d'instruments et d'instruments isolés à l'intérieur de chaque famille et une complexité croissante des mélodies. Des sons plus complexes et des accompagnements étaient introduits chaque semaine. Des fiches pédagogiques, imagées et détaillées concernant la fabrication, l'utilisation et la nature du son produit étaient fournies. Les scores des participants étaient significativement supérieurs après la période d'entraînement et se différenciaient significativement de ceux du groupe contrôle non entraîné. L'entraînement a également permis de modifier leur degré d'appréciation de la musique en général, et de certains timbres en particulier. Une autre étude s'est attachée à mesurer si un entraînement du traitement de contours mélodiques différents pouvait améliorer la perception de la mélodie.

Les performances de base du groupe de 6 sujets en reconnaissance de mélodies familières devenaient satisfaisantes si les intervalles entre les notes étaient supérieurs à 2 demi-tons et si le rythme était respecté. La perception du contour mélodique n'était possible que si de 2 à 5 demi-tons séparaient les notes. Les items utilisant des notes médiums et aigües donnaient de meilleurs résultats (Galvin, Fu, & Nogaki, 2007). La durée totale de l'entraînement a été variable entre les sujets mais en moyenne une heure quotidienne y était consacrée. Les effets du programme ont porté à la fois sur les performances en perception du contour mélodique et sur la reconnaissance des mélodies familières.

Un entraînement musical a été proposé à 9 enfants dès l'activation de leur implant comparés à un groupe contrôle qui n'a pas reçu de leçons de musique (Yucel, Sennaroglu, & Belgin, 2009). Leur moyenne d'âge était de 55 mois au moment de la chirurgie. Tous les enfants bénéficiaient de prothèses dès le diagnostic et étaient tous impliqués dans des programmes d'apprentissage de la langue orale. Les enfants ont été dotés d'un clavier électrique et l'entraînement était effectué à domicile par les parents à raison de 10 minutes minimum quotidiennes sur une durée totale de deux ans. La progression était découpée en trois niveaux de difficulté croissante : (1) comparaison de 2 notes isolées initialement éloignées en fréquence puis de plus en plus proches ; (2) comparaison de séquences de 2 notes de moins en moins contrastées ; (3) comparaison de patrons rythmiques (de 2 jusqu'à 4 notes). Des mesures de perception langagières ont été comparées régulièrement et portaient sur des reconnaissances de phonèmes, de l'identification de mots en liste fermée, de la compréhension d'ordre simples et de phrases courantes. Les enfants du groupe musique ont progressé plus rapidement que les enfants du groupe contrôle. Un questionnaire d'appréciation adressé aux parents faisait apparaître également que les enfants du groupe musique étaient plus intéressés que ceux du groupe contrôle lorsque de la musique était diffusée dans leur environnement et l'accompagnaient volontiers par de la danse ou en tapant dans leurs mains. Leur chant est également rapporté comme plus juste.

En résumé, les programmes d'entraînements auditifs semblent produire davantage d'effets ou accélérer l'adaptation passive à l'input sonore. Cependant, le nombre d'études publiées à ce jour ne permet pas de déterminer quels protocoles, quel matériel ni quelle fréquence d'entraînement produisent les effets les plus marqués. Certaines études ont montré que l'entraînement a donné lieu à des généralisations. Les programmes d'entraînement partagent certains critères : l'engagement actif du participant, une progression de la difficulté et généralement un feed-back correctif. Ils stimulent les processus bottom-up et leur objectif est de développer le traitement auditif périphérique. C'est le cas du CAST program de Fu et Galvin ou du Fast ForWord program de Tallal. Une approche top-down cible les mécanismes de traitement auditif de haut niveau en utilisant les mécanismes de bas niveau (par exemple la discrimination phonétique dans un environnement bruyant) et implique donc l'utilisation de tâches complexes. Ces approches permettraient de modifier les réponses neuronales. A notre connaissance, il n'existe pas d'études électrophysiologiques portant sur les modifications des patrons de réponses neuronales consécutives à un entraînement auditif chez les adultes implantés. Cependant, il est établi que les modifications comportementales dépendent de modifications cérébrales, et nous pouvons donc logiquement soutenir l'idée que l'entraînement auditif modifie le tuning neuronal. Leur avantage réside dans une économie de temps, les entraînements étant limités à une fenêtre temporelle n'excédant pas plusieurs quelques semaines) et leur faible coût financier (Fu & Galvin, 2007).

4. Résumé

Les approches thérapeutiques et conceptuelles des méthodes d'éducation auditive chez les enfants sourds et des programmes d'entraînement auditifs s'inscrivent donc dans des fenêtres temporelles fort différentes. Les méthodes de prise en charge sont adaptées au profil clinique des enfants, la progression est donc souple et varie souvent d'un individu à un autre et surtout s'inscrivent dans le projet thérapeutique et éducatif global de chaque individu. Il est également possible de différer un travail spécifique dans le temps. En revanche, certaines tâches discriminatives nécessitent la répétition (parfois laborieuse) de l'exercice, en particulier dans les contrastes phonétiques et le renouvellement du matériel pour maintenir la motivation et l'intérêt de l'enfant peu évident.

Les programmes d'éducation auditive peuvent donc constituer un moyen alternatif et complémentaire aux méthodes d'éducation auditive décrites.

Dans les programmes informatisés que nous avons présentés (Earobics ou CAST) le passage au niveau supérieur est subordonné à la réussite totale au niveau en cours, ce qui constitue une limite si la tâche proposée à l'enfant n'est pas accessible à ses capacités. Au mieux, dans ce cas, il peut utiliser le feedback pour modifier ses réponses sans toutefois les comprendre.

A notre connaissance, il n'existe pas de programme d'entraînement auditif ciblant à la fois toutes les opérations cognitives de la perception auditive et une variété des stimuli sonores. Couplée à une activité motrice, nous soutenons cependant que l'approche multimodale permettrait la stimulation d'un plus nombre d'aires cérébrales et favoriserait la plasticité cérébrale au niveau des aires auditives.

Objectifs de la thèse et Hypothèses

Le premier objectif de ce travail de thèse est d'étudier si et comment des moyens augmentatifs de stimulation de la fonction auditive comme 1) un programme d'entraînement auditif de courte durée, le « Son en Mains » stimulant les opérations cognitives de la perception auditive permet de développer chez des enfants sourds, utilisateurs principalement de la langue des signes, et chez des enfants porteurs d'un implant cochléaire et utilisateurs de la langue orale, des stratégies générales d'écoute et des transferts vers des tâches auditives non entraînées et améliorer la production de la parole et 2) des cours de musique influencent les performances auditives générales et les mécanismes d'apprentissage chez des enfants implantés et/ou porteurs de prothèses auditives. Les interventions thérapeutiques reposent sur l'objectif d'induire, par l'entraînement, un fonctionnement neuro-cognitif plus efficace qui permettrait à la fois d'améliorer les performances de perception auditive (et les fonctions qui en dépendent) et de réduire (ou alléger) la lourdeur et la longueur de la prise en charge rééducative.

Il a été démontré que les phénomènes de plasticité cérébrale sont dépendants des tâches et des caractéristiques acoustiques des stimuli employés. Il apparaît donc crucial d'éviter la fragmentation des opérations et de stimuler parallèlement chacune des opérations cognitives participant à la perception auditive, et ce, en proposant de la « matière » sonore diversifiée et écologique d'une façon attrayante pour s'assurer de (et entretenir) la motivation des enfants. Actuellement, aucun programme d'entraînement ne propose de développer la perception auditive des enfants sourds par un croisement progressif des difficultés des opérations perceptives et des sources sonores. Nous proposons donc de vérifier si notre programme d'entraînement auditif le « Son en Mains » qui stimule les opérations cognitives de la perception auditive couplée à une grande diversité de stimuli auditifs permettrait d'augmenter l'acuité perceptive chez des enfants sourds utilisant majoritairement la modalité linguistique gestuelle et chez des enfants porteurs d'un implant cochléaire utilisateurs de la langue orale (étude 1). Nous comparons les performances des enfants avant (pré-test) et après entraînement (post-test) dans les tâches entraînées mais également dans d'autres tâches perceptives, comme la perception phonétique à travers un test que nous avons construit, le monitoring de la voix et la précision articulatoire chez les enfants implantés. Les paramètres vocaux seront comparés à une base normative (enfants normo-entendants de 4 à 12 ans) que nous avons construite.

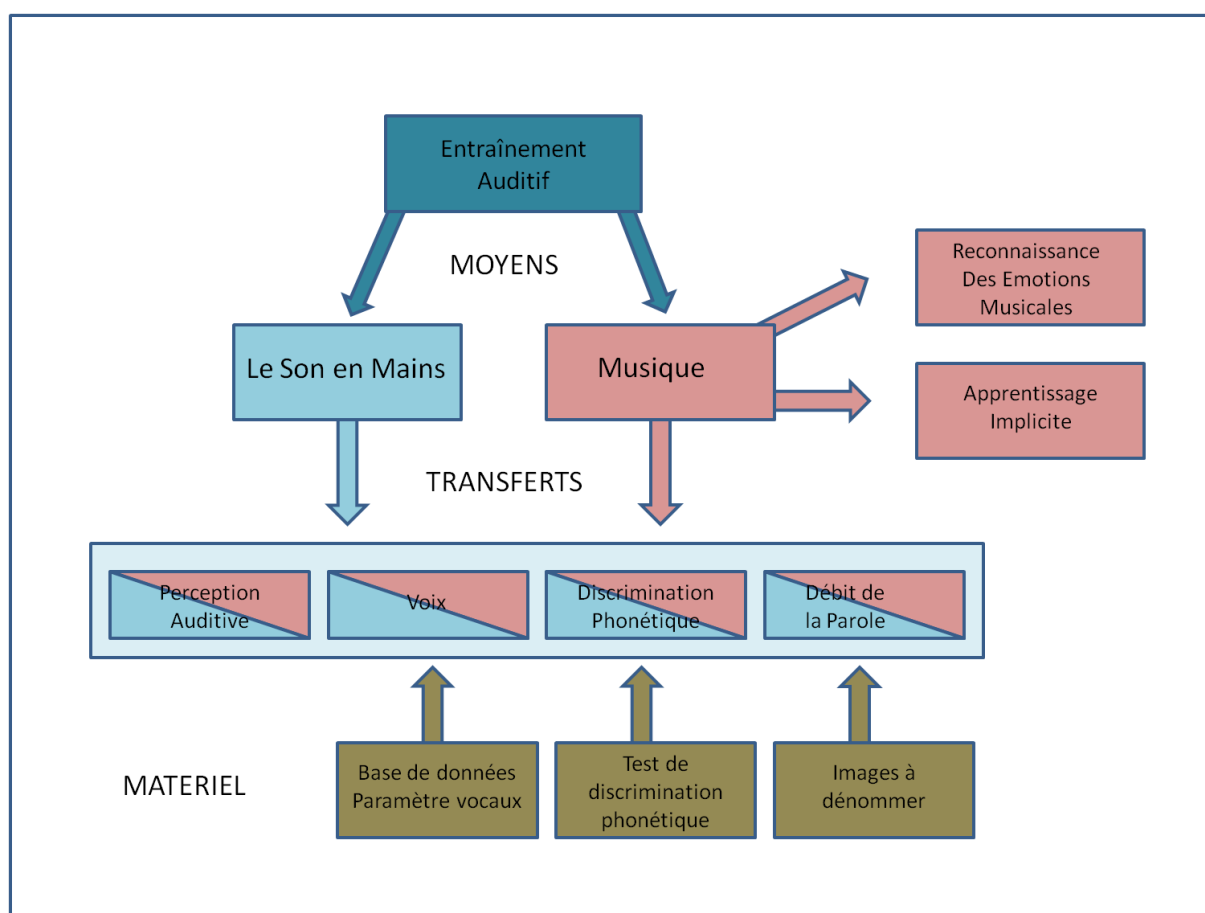
La musique constitue un matériel acoustique très riche. La pratique musicale requiert la participation des systèmes moteur et somatosensoriel dont les centres cérébraux sont interconnectés aux voies auditives. Peu d'études ont testé les effets spécifiques d'un entraînement musical chez les enfants sourds sur les performances langagières et aucune sur le monitoring de la voix. L'objectif de notre étude 2 est d'évaluer les effets d'un entraînement musical chez des enfants sourds implantés et des enfants porteurs de prothèses auditives. Dans cette étude, nous comparerons les performances des enfants du groupe musique à celles d'enfants contrôles. Afin de caractériser la pertinence de chacune des deux méthodes d'entraînement testées, nous comparons les performances des enfants entraînés avec de la musique à celles des enfants entraînés avec le « Son en Mains » selon les différentes mesures utilisées.

Le deuxième objectif (étude 3) de cette thèse est d'évaluer si les effets d'un entraînement musical permettent d'augmenter 1) les capacités d'apprentissage implicite des enfants sourds ainsi que 2) leurs compétences dans le traitement des émotions musicales. Des études ont montré que les effets délétères du retard de langage sur le développement des processus d'apprentissage (apprentissage implicite séquentiel).

Les deux premières études ont nécessité l'étalonnage d'une base normative des paramètres vocaux des enfants normo-entendants et une revue de littérature sur l'utilisation de la musique en thérapie cognitive qui constituent une contribution méthodologique et théorique à cette thèse.

L'organisation de la thèse est présentée dans la Figure 1.

Figure1 : Organigramme de la thèse



Ce chapitre présente les dessins expérimentaux et prédictions pour chacune de ces trois études et leurs sous-questions, ainsi que la procédure générale utilisée pour le recueil des données.

1. Étude 1 : Évaluer les effets d'un programme d'entraînement auditif de courte durée le « Son en Mains »

Question 1 : Les indications. Les enfants sourds profonds constituent une population très hétérogène en fonction de l'âge d'appareillage, du type d'appareillage et de la modalité linguistique utilisée. De nombreuses études montrent que la précocité de l'implantation est positivement corrélée aux performances auditives et langagières, de même que la durée d'utilisation de l'implant. Quelle catégorie(s) d'enfants bénéficieraient le plus de l'entraînement le « Son en Mains » et à partir de quel âge ?

Pour répondre à cette question, nous proposons d'évaluer les effets de l'entraînement chez des enfants sourds profonds présentant un faible niveau langagier et utilisateurs majoritaires de la langue des signes en comparant leurs performances auditives avant et après entraînement et chez des enfants implantés éduqués en modalité orale âgés de 4 à 10 ans. Nous émettons l'hypothèse que les performances auditives des enfants dans les tâches entraînées augmenteront, quel que soit leur statut langagier et prothétique.

Question 2 : Les effets de transfert. En stimulant toutes les opérations cognitives de la perception auditive, est-ce que l'amélioration des performances auditives se limite aux tâches entraînées ou peut-elle s'étendre à du matériel auditif non entraîné ?

Pour évaluer cette question, nous avons réalisé administré en pré-test et en post-test une épreuve de discrimination auditive portant sur les paires minimales et enregistré la voix des enfants en dénomination de 20 images de haute fréquence, ainsi que le [a] soutenu. Nous nous attendons à une amélioration des performances en discrimination phonétique, à un rapprochement des valeurs normatives de la voix et une amélioration de la production de la parole.

2. Étude 2 : Évaluer les effets de la pratique musicale sur les compétences perceptives, phonétiques et le monitoring de la voix

Question 1 : Comment et sur quels domaines se manifestent les effets des stimulations musicales ?

Nous comparons les scores de 2 groupes d'enfants issus du même établissement aux différentes épreuves de notre protocole d'évaluation afin de déterminer s'il existe des différences entre les performances à chacun des items.

Nous nous attendons à un effet de l'apprentissage musical sur les performances de perception phonétique et de mémoire.

Question 2 : Quelle la pertinence respective des deux types d'entraînement ?

Pour répondre à cette question, nous comparons les performances des enfants entraînés avec la musique avec celles des enfants entraînés avec le « Son en Mains ». Compte-tenu des liens privilégiés entre la musique et le langage, et des effets de la musique sur la cognition en général, nous nous attendons à ce que les enfants du groupe « musique » présentent des performances comparables à celles des enfants après entraînement avec le « Son en Mains » dans les épreuves de perception phonétique et acuité de la parole. Nous pensons également que leurs performances en mémoire auditive seront supérieures à celle des enfants non musiciens.

3. Étude 3 : Évaluer les compétences de perception des émotions musicales et d'apprentissage implicite

Question 1 : Quelle acuité les enfants sourds démontrent-ils dans la perception des émotions musicales ?

Pour répondre à cette question, nous avons appareillé un groupe de 22 enfants sourds profonds (implantés et porteurs de prothèses auditives) à un groupe de 26 enfants normo-entendants du même âge qui ont évalué l'émotion dégagée par des extraits musicaux.

Question 2 : Existe-t-il un effet du type d'appareillage ?

L'implant cochléaire limitant la perception du contour et des intervalles musicaux, nous formulons l'hypothèse que les enfants appareillés conventionnellement obtiendront de meilleures performances que les enfants implantés.

Question 3 : Il a été démontré que les performances langagières sont corrélées aux capacités d'apprentissage séquentiel. Les enfants du groupe musique présentent-ils des capacités d'apprentissage implicite séquentiel ?

Nous basant sur les effets positifs de l'apprentissage de la musique sur les capacités langagières chez les enfants normo-entendants, nous formulons l'hypothèse que les enfants sourds éduqués musicalement présenteront des capacités d'apprentissage implicite séquentiel proches de celles des enfants normo-entendants.

4. Procédure générale

Trois échantillons d'enfants sourds et trois échantillons d'enfants entendants ont été recrutés pour nos études.

Etude 1

6 enfants (2 sourds sévères 3^{ème} groupe et 4 sourds profonds dont 1 implanté) recrutés à l'Institut d'Education Sensorielle d'Auxerre et 19 enfants porteurs d'un implant cochléaire recrutés au Service d'ORL Pédiatrique de l'Hôpital de la Timone à Marseille ont participé à l'étude 1. Le premier groupe de 6 enfants a été entraîné selon le protocole le « Son en Mains » par moi-même. Le deuxième groupe a été entraîné (protocole « Son en Mains ») par les orthophonistes du service d'ORL Pédiatrique de la Timone (simple aveugle). Toutes les séances de tests ont été réalisées par moi-même (pré-test, post-test et 2^{ème} post-test pour le premier groupe qui servait de propre contrôle). La moitié du groupe des enfants implantés a été entraîné pendant 16 semaines, le second groupe constituant le groupe contrôle. Au cours des 16 semaines suivantes, le deuxième groupe a été entraîné. Pour des raisons de calendrier (vacances scolaires) tous les participants n'ont pu participer à la troisième session de test. Nous utilisons donc les données issues de la première phase d'entraînement. Cette phase de l'expérimentation teste les questions 1 et 2 de l'étude 1 (les indications et les effets de transfert).

Etude 2

En raison de différences d'âge entre nos deux groupes expérimentaux, nous comparons le sous-groupe des grands enfants entraînés avec le « Son en Mains » (n=7) avec

les enfants entraînés avec la musique (n=14). Les enfants entraînés avec la musique ont été soumis aux mêmes épreuves de notre protocole d'évaluation (capacités perceptives, le test de discrimination phonétique et l'enregistrement de leur voix pour la dénomination des 20 images et le [a] soutenu). Cette phase d'expérimentation correspond aux questions 1 et 2 de l'étude 2.

Etude 3

Un premier groupe de 21 enfants sourds profonds (8 implantés et 13 porteurs de prothèses auditives) et un second groupe de 22 enfants sourds profonds (8 implantés et 14 porteurs de prothèses auditives) ont participé aux deux volets de l'étude 3. Certains ont participé aux 2 expérimentations (évaluation de la perception des émotions musicales et évaluation des capacités d'apprentissage implicite séquentiel). Toutes les évaluations ont été individuelles, dans une pièce calme. La première expérimentation correspond aux questions 1 et 2 de l'étude 3. La seconde expérimentation répond à la question 3 de l'étude 3.

5. Plan de la partie expérimentale

La partie expérimentale est composée de 7 articles. Les deux premiers (l'un en français et l'autre en anglais) sont publiés (Revue de Neuropsychologie et Annals of the New York Academy of Science) et présentent tous deux les résultats auditifs obtenus après entraînement auprès du même groupe d'enfants utilisateurs de la langue des signes. Ils diffèrent cependant par la présentation détaillée de la maquette et du programme d'entraînement dans le premier et par la présentation des effets de transfert vers une tâche auditive non entraînée pour le second. Le troisième et le quatrième article (en préparation) comparent les performances des enfants implantés après entraînement au groupe contrôle auquel ils ont été appareillés, dans les tâches auditives et la tâche de discrimination phonologique (article 3) tandis que l'article 4 focalise sur les effets obtenus en production orale (voix, débit, articulation). Ces quatre articles permettent de répondre aux questions 1 et 2 de l'étude 1.

Le cinquième article (en préparation) compare les performances des enfants qui suivent un entraînement musical aux enfants ayant bénéficié de l'entraînement le «Son en Mains ». Cet article apporte une réponse aux questions 1 et 2 de l'étude 2.

Le sixième article évalue les capacités de perception des émotions musicales et répond aux questions 1 et 2 de l'étude 3.

Le septième article décrit l'ensemble de l'étude visant à évaluer les capacités d'apprentissage implicite séquentiel avec une tâche de grammaire artificielle visuelle.

6. Contribution méthodologique et théorique

Le huitième et le neuvième article constituent une contribution méthodologique et théorique avec la construction d'une base données concernant les caractéristiques vocales obtenues chez des enfants normo-entendants de 4 à 11 ans et une revue de littérature sur l'utilisation de la musique dans les thérapies cognitives.

PARTIE EXPÉRIMENTALE

Article 1 : Entraînement auditif et éducation auditive chez les enfants sourds

Françoise Rochette, Pierre Pescheux & Emmanuel Bigand (2008)
Revue de Neuropsychologie, Vol. 18, n°1-2, pp 61-78

Abstract: Despite new technological advances in the rehabilitation of audition in deaf children, auditory training stays a fundamental stage in their education. However, it is necessary to study what kind of stimuli, what kind of auditory tasks and what kind of learning procedure generate the faster and the most stable results. We have tested a programme including numerous stimuli, all perceptive cognitive operations in an implicit learning procedure with 6 severe or profound deaf children. The first results demonstrate an improvement of their auditory performances and a decrease in their processing times, immediately after the end of the auditory training but also a long-term stability of certain performances.

1. Introduction

L'objectif de cette étude est d'évaluer l'impact d'un programme d'entraînement auditif sur les performances auditives d'enfants sourds. Les études d'imagerie cérébrale ont montré que le cerveau est capable d'une grande plasticité et les modifications corticales liées à l'apprentissage auditif sont promptes à apparaître (Pantev, Wollbrink, Roberts, & Engelien, 1999). Cela conduit à nuancer la notion de période critique du développement du langage mais aussi de préciser les effets de la simple exposition aux stimuli et de l'apprentissage auditif (Kral & Eggermont, 2007; Trehub, 2005). Les données concernant l'adaptation auditive et corticale aux nouvelles informations auditives par les porteurs d'implants adultes le confirment (Giraud, Price, Graham, Truy, & Frackowak, 2001). Dans ce contexte, la façon de concevoir les entraînements auditifs prend une importance considérable. Les réorganisations cérébrales pourraient en effet varier fortement selon le mode d'entraînement proposé aux enfants sourds. Cette étude est une première contribution à ce que nous pourrions dénommer l'ergonomie cognitive des apprentissages auditifs pour les enfants sourds.

Dans la première section, nous considérons les stimuli, les tâches et les procédures d'entraînement généralement utilisés et nous soulignons les limites relatives à chacun de ces points. Nous proposons ensuite une nouvelle situation d'entraînement auditif dont nous évaluons les effets sur un groupe d'enfants malentendants.

La plupart des études concernant le choix des stimuli ont été menées auprès d'adultes présentant une surdité post-linguale dans des programmes d'entraînement auditif post-implantation, dans l'objectif d'en évaluer les effets sur l'amélioration de la perception de la parole. Cependant, les différentes données ne permettent pas de noter une supériorité de tel ou tel type de stimulus. Ainsi, Fu et Galvin (2007) ont testé 2 hypothèses : dans une première étude, ils ont évalué les effets d'un entraînement portant sur un aspect acoustique saillant de la perception de la parole (le contraste fréquentiel Donaldson & Nelson, 1999) et ont mis au point un entraînement portant sur la discrimination de paires d'électrodes de fort contraste fréquentiel (par exemple électrodes 8 et 15) puis plus proches (par exemple électrodes 11 et

14). L'entraînement était de type massé, c'est-à-dire durait 2 heures quotidiennes pendant 5 jours consécutifs pour chaque type de contraste. Les mesures effectuées immédiatement après l'entraînement ont démontré une augmentation des performances dans la reconnaissance des voyelles et des consonnes, mais également à plus long terme puisque des mesures effectuées 15 jours plus tard démontraient une reconnaissance dans les tâches non entraînées supérieures à celles obtenues au pré-test. Dans une autre étude, ces mêmes auteurs ont utilisé des stimuli linguistiques et ont entraîné 10 sujets dans une tâche de discrimination de syllabes avec un matériel constitué de 1000 syllabes prononcées par des voix féminines et des voix masculines. Les sujets ont bénéficié d'un entraînement intensif (1 heure par jour, 5 jours par semaine pendant 1 mois). Les résultats ont mis en évidence une augmentation très significative du groupe expérimental dans la reconnaissance des syllabes, cependant avec des variations inter-individuelles qui semblent suggérer que les temps d'entraînement constituent une variable dont il faut tenir compte. Chez les enfants sourds prélinguaux, l'approche privilégiée par les professionnels est de type clinique : l'éducation auditive, et donc la sensibilité aux différents paramètres des sons, est centrée sur l'individu, et tient compte des caractéristiques audiologiques et des centres d'intérêts manifestés par les enfants.

Cependant, les caractéristiques acoustiques des stimuli ne constituent qu'un aspect de l'entraînement auditif et pour Fu et Galvin (2007), les processus perceptifs mis en jeu au cours de l'apprentissage ont un rôle important. Les tâches couramment proposées dans les programmes d'entraînement auditifs ne font appel qu'à un processus perceptif : la discrimination (de paires d'électrodes, de phonèmes (Fu et Galvin 2007)) ou l'identification (tâche de reconnaissance de parole filtrée Fu & Galvin, 2006) ou bien les 2 opérations que sont identification et discrimination (Hesse et al., 2001). Cependant, le traitement auditif se décompose en quatre opérations cognitives MacAdams & Bigand, 1994: l'identification, la discrimination, l'analyse de scènes auditives et la mémoire auditive. L'identification suppose que les traits acoustiques pertinents soient traités par le système auditif (analyse des propriétés microtemporelles et /ou macrotemporelles) c'est-à-dire la prise en compte de la nature de la structure résonante qui entre en vibration (McAdams and Bigand 1994) et permet le mécanisme de reconnaissance. Cette opération s'applique donc à la saisie des invariants structuraux des sources sonores. La discrimination concerne les invariants transformationnels, c'est-à-dire les variations des modifications acoustiques au-delà desquelles l'on décide que les sources sonores correspondent au même objet sonore ou à un autre objet sonore. L'analyse de scènes auditives est issue de la théorie de la Gestalt et fait référence aux groupements ou ségrégation des flux acoustiques par notre appareil auditif afin de permettre la représentation de notre environnement sonore en objets sonores. Enfin la mémoire auditive est au service des trois autres opérations en permettant l'ajustement d'une source sonore aux représentations déjà stockées en mémoire à long terme (MLT).

Ces 4 opérations cognitives du traitement du signal sonore ne fonctionnent pas de façon séquentielle mais au contraire s'activent mutuellement.

Il n'existe pas à notre connaissance d'entraînement auditif mettant en jeu ces 4 opérations perceptives, la littérature portant systématiquement sur des tâches d'identification et/ou des tâches de discrimination (Fu & Galvin, 2007).

Examiner le temps nécessaire à chaque séance d'entraînement et le temps total de l'entraînement fait nécessairement appel aux théories de l'apprentissage. L'apprentissage massé va se distinguer de l'apprentissage distribué par la façon dont les sessions d'entraînement sont réparties. Différentes expériences ont donc été effectuées en divisant les sujets dans ces deux conditions. Les résultats obtenus par le groupe « apprentissage réparti » à différentes tâches (apprentissage du morse, de la dactylographie ou encore de machines à trier le courrier) ont toujours été supérieurs à ceux du groupe « apprentissage massé » (Baddeley, 1993). Par ailleurs, l'effet de la répartition de l'entraînement suggère que l'on considère la

présentation des items comme des situations d'apprentissage successives, permettant ainsi un effet de la pratique du rappel (Baddeley, 1993). Cet effet se remarque seulement si l'on stimule la mémoire alors que le sujet est encore capable de rappeler. Cependant, si le rôle de la répétition est indéniable, elle ne peut à elle seule garantir l'optimalité des performances, et le niveau de traitement effectué par les sujets constitue un facteur important (voir *stimuli* et *tâches*), en particulier le codage que la présentation de l'item suscite. Ainsi un matériel qui peut être codé sémantiquement sera mieux rappelé. Dans le domaine d'un entraînement auditif, Fu et Galvin (2007) ont utilisé avec des adultes un patron d'entraînement intensif (1 à 2 heures quotidiennes, 5 jours par semaine pendant 1 mois) mais concluent cependant que les tâches n'étant pas égales en terme de difficultés, certaines tâches perceptives seront plus longues à maîtriser que d'autres. Par exemple, la discrimination de la hauteur nécessite plus de séances d'entraînement que la discrimination d'intervalles (Wright & Sabin, 2007). Par ailleurs, les longues séances d'apprentissage ne s'accompagnent pas des meilleurs scores lors de séances de rappel chez les adultes, que ce soit dans des tâches motrices, dans des tâches verbales (Baddeley, 1993) ou dans les tâches auditives (Wright & Sabin, 2007).

Les données ci-dessus mentionnées ont été observées dans des situations d'apprentissage intentionnel. Ce type d'apprentissage s'oppose à l'apprentissage implicite. Dans ce cas, le sujet apprend (une procédure, une règle, un langage, des connaissances musicales...) à son insu, sans intention d'apprendre par simple exposition (ou expositions répétées) au stimulus. Cet apprentissage peut s'observer à tout âge et concerner des domaines très variés : par exemple, une procédure graphique (Detafle & Vinter, 2006), une règle organisant une succession de lettres (grammaire artificielle), mais aussi des informations auditives, comme un langage artificiel (Saffran et al., 1996) ou des connaissances musicales (Bigand & Poulin-Charronnat, 2006).

Les stimuli utilisés dans les programmes menés auprès d'adultes, bien qu'ils conduisent à des performances intéressantes, paraissent difficilement transposables auprès de jeunes enfants. Par exemple, l'entraînement à la discrimination d'électrodes de Fu et Galvin impliquent une mobilisation importante de l'attention et l'acceptation de la redondance des séances. Chez les enfants, il est judicieux, voire indispensable, d'utiliser des stimuli attrayants pour les enfants, ce qui permet de maintenir un état d'éveil et de participation adapté à l'objectif. La musique et le langage représentent les deux domaines sonores pour lesquels les enfants entendants manifestent le plus d'intérêt, et pour lesquels ils présentent des compétences perceptives très précoces. Cependant, les préférences des enfants semblent contradictoires selon le domaine sonore concerné. Par exemple, dans le domaine du langage et des voix, ils manifestent une préférence pour les voix familières (Decasper & Fifer, 1980), les mots familiers comme leur prénom (Mandel, Jusczyk, & Pisoni, 1995) et leur langue maternelle (Mehler, Jusczyk, Lambertz, & Hasted, 1988). En revanche, dans le domaine de la musique, les enfants sont généralement intéressés par des mélodies nouvelles plutôt que celles qu'ils connaissent déjà (Saffran, Loman, & Robertson, 2000). Par ailleurs, les données recueillies auprès d'enfants implantés très précocement démontrent des goûts auditifs analogues à ceux des enfants entendants (comptines, musiques de leurs émissions télévisées), un intérêt pour le langage, et surtout, développement des compétences préverbaux analogues à celles des enfants entendants (Tait, Raeve, & Nikolopoulos, 2007). Ainsi, l'utilisation d'une grande variété de stimuli, permettant à la fois de confronter les représentations familières avec leurs correspondances sonores de même que la découverte de nouveaux sons semble intuitivement pertinente et offre la possibilité à un moment non seulement de solliciter les enfants selon leurs préférences mais également de pouvoir les développer.

Nous n'avons pas trouvé dans la littérature de recherche faisant état d'un entraînement portant sur les 4 opérations perceptives, précédemment décrites que sont l'identification, la

discrimination, l'analyse de scènes auditives et la mémoire auditive. Les programmes post-implant proposés pour les adultes sont basés sur l'utilisation de l'identification ou la discrimination. Cependant, puisque ces 4 opérations perceptives fonctionnent de façon sérielle, un entraînement auditif qui stimule chacune de ces opérations devrait permettre une amélioration globale des performances auditives plus importante. L'expérimentation doit nous permettre également de déterminer s'il est nécessaire de les représenter de façon équivalente en terme quantitatif ou si des tâches requièrent davantage d'entraînement que d'autres.

Enfin, les enfants sourds sont soumis à de nombreuses séances d'apprentissage supervisées au cours desquelles le contenu est nettement explicite. Cependant, il est possible de détourner l'attention des enfants de l'objectif de la séance d'entraînement (à savoir l'amélioration des performances auditives) vers un matériel ludique et varié qui requiert un traitement auditif analogue à celui d'un entraînement traditionnel.

Afin de stimuler la fonction auditive chez les jeunes enfants, et pour éviter la redondance des tâches et du matériel utilisé par les orthophonistes, nous avons élaboré un programme d'éducation auditive le « Son en Mains ». Les 4 opérations perceptives de base que sont l'identification, la discrimination, l'analyse de scènes auditives et la mémoire auditive, telles que définies par Mc Adams et Bigand sont exercées en suivant une progression hiérarchique. Au début de l'entraînement, les opérations simples (identification et discrimination) sont majoritaires et l'introduction des tâches plus complexes y est effectuée de façon graduelle. 4 grands types de stimuli (sons de l'environnement, voix, musique et sons abstraits) y sont représentés. L'utilisation des sons abstraits permet de réelles tâches perceptives puisqu'aucun signifiant ne peut y être rattaché. L'entraînement a été conçu pour une durée de 20 semaines, les sessions durent environ une demi-heure. L'apprentissage est de type implicite : les enfants sont invités à « jouer » avec les différents modules qui constituent la maquette tout en effectuant des traitements auditifs de plus en plus complexes.

Nous pensons qu'une méthode d'apprentissage auditif qui réunit une grande richesse de sons (4 familles), les 4 opérations perceptives de l'audition, et une procédure d'apprentissage de type « indirect » permettra aux enfants présentant une déficience auditive sévère à profonde d'améliorer leurs performances auditives.

2. Méthodologie

2. 1. Participants

Cette étude a été menée auprès de 6 enfants (4 garçons et 2 filles) scolarisés dans un institut d'éducation sensorielle. Au début de l'étude, les enfants étaient âgés de 8 à 10 ans (Moyenne : 9 ans). 4 présentent une surdité profonde et 2 une surdité sévère. Un enfant est porteur d'un implant cochléaire et les autres sont appareillés de façon conventionnelle. Le projet linguistique des enfants est le bilinguisme LSF / langue orale pour 5 d'entre eux et LSF pure pour un. Tous sont atteints d'une surdité congénitale. Ils ne présentent pas de comorbidité connue à ce jour. Aucune modification concernant leur appareillage n'a été apportée au cours de la période d'entraînement, ni après. Pendant cette période, ils ont poursuivi leur scolarité et leurs rééducations habituelles (psychomotricité et orthophonie). Le projet orthophonique de l'établissement d'accueil porte sur l'acquisition du Langage Parlé Complété, le développement du vocabulaire et soutient l'acquisition du langage écrit.

Tableau n°1: Caractéristiques des sujets

	Age	Type de surdité	Appareillage	Projet linguistique
S1 (F)	10	sévère	Contours	Bilinguisme
S2 (G)	8	profonde	Implant	Bilinguisme
S3(G)	8	profonde	Contours	Bilinguisme
S4(G)	10	profonde	Contours	Bilinguisme
S5(F)	9	sévère	Contours	Bilinguisme
S6(G)	9	profonde	Contours	LSF

2. 2. Matériel

L'expérience se réalise avec une maquette qui est plateforme de jeux en bois reliée et « pilotée » par un ordinateur. Les sons sont diffusés par haut-parleurs. Les sons appartiennent aux 4 grandes catégories sonores que sont les sons de l'environnement (bruits de la rue, de la maison, cris d'animaux), les voix (voix d'hommes, de femmes et d'enfants présentant ou non des accents étrangers dont le contenu sémantique est volontairement inaccessible aux enfants), des sons musicaux (instruments de musique) et sons abstraits (sons électro-acoustiques, sons industriels).

Figure1 : Maquette le « Son en Mains »



2. 3. Procédure

Pour la tâche d'identification, l'enfant est placé devant le « clavier » et doit placer l'une des 6 figurines du clavier qui correspond au son présenté par l'expérimentateur. En glissant la figurine sur la touche du clavier, l'enfant découvre s'il a choisi ou non le son exact. Dans la tâche de discrimination, l'enfant place un pion aimanté dans un relief en creux qui peut ou non modifier le son entendu. Il doit alors décider s'il s'agit d'un pion « magique » qui modifie le son. Le changement porte ici sur un paramètre précis du son (hauteur, timbre ou tempo de la séquence). L'entraînement s'effectue avec 12 pions. Dans la tâche d'analyse de scènes auditives chacun des trous du damier est comblé par un pion rouge aimanté. En soulevant les pions rouges un à un, il est possible de faire disparaître une source sonore constituant la scène sonore entendue par l'enfant. Lorsque cette modification est perçue, l'enfant remplace le jeton rouge par un jeton d'une autre couleur. Dans la tâche de mémoire auditive, l'expérimentateur délivre 2 sons (ou plus) et les enfants doivent les retrouver (de préférence dans l'ordre) en activant les touches du clavier.

L'entraînement se déroule sur une période de 6 mois à raison d'une demi-heure hebdomadaire. Les enfants sont soumis à 20 séances d'entraînement d'une durée de 30 minutes environ. La progression de l'apprentissage s'effectue en variant la complexité des tâches exécutées (l'identification étant plus facile que la mémoire) et la complexité des sons utilisés (les sons abstraits étant plus difficiles que les sons de l'environnement). Ce croisement offre une progression de difficulté en « diagonale » qui assure également une variété dans les séances d'entraînement, l'enfant découvrant petit à petit des exercices et des sons nouveaux.

Tableau n° 2: Progression des exercices

	Identification	Discrimination	Analyse des scènes auditives	Bipartimétrique	Mémoire séquentielle
Sons d'entraînement tamplier	séance 1A	séance 1B	séance 2B	séance 6B	séance 8B
	séance 2A	séance 3B	séance 6A	séance 7B	séance 9B
Sons parole	séance 3A	séance 4B	séance 7A	séance 10B	séance 12B
	séance 4A	séance 5B	séance 11B	séance 14B	séance 16B
Sons Instrumentaux	séance 5A	séance 9A	séance 13B	séance 15B	séance 17B
	séance 8A	séance 10A	séance 15A	séance 17A	séance 19A
Sons abstraits	séance 11A	séance 13A	séance 16A	séance 18A	séance 20A
	séance 12A	séance 14A	séance 18B	séance 19B	séance 20B

Complexité des domaines
sonores

2. 4. Plan d'expérience

En l'absence de groupe contrôle, les mesures ont été effectuées à 3 périodes : phase de pré-test (T1), immédiatement après l'entraînement (T2) et enfin 6 mois après l'entraînement (T3). Les scores portent sur la précision et la vitesse des performances des enfants lors de la réalisation des exercices figurant à la ligne 2 du programme, soient 2 exercices d'identification, 2 exercices de discrimination, 2 d'analyse de scènes auditives et enfin 2 de mémoire, tous étant réalisés avec des sons de l'environnement. Nous supposons que les scores en T2 et T3 seront meilleurs que ceux observés avant apprentissage en T1. Cette hypothèse pourrait paraître élémentaire pour les enfants normo-entendants. Elle ne l'est cependant pas pour des enfants sourds, étant donné la courte période d'entraînement et le nombre limité des séances d'entraînement.

3. Résultats

La figure 2 présente des scores de bonnes réponses et les temps de réalisation des exercices d'identification, de discrimination, d'analyse de scènes auditives et de mémoire observés avant, juste après et 6 mois après entraînement.

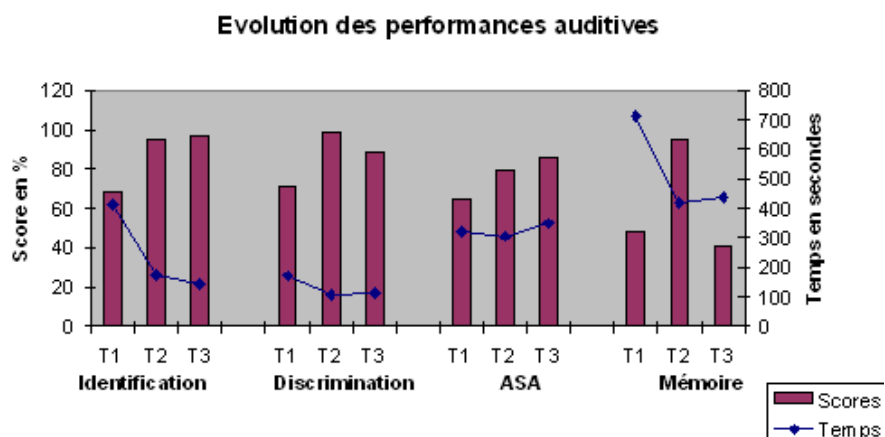
En ce qui concerne l'identification, l'ANOVA met en évidence un effet principal de la période de test, ($F(2,33) = 18,32$ $p < ,000$). Les performances sont supérieures en T2 et en T3 par rapport à T1 ($F(1,33) = 25,12$ $p < ,000$ et $F(1,33) = 29,64$ $p < ,000$) et il n'y a pas de différence entre T2 et T3. L'ANOVA montre également un effet principal de la période de test sur les temps de réalisation des exercices ($F(2,33) = 18,86$ $p < ,000$). Les temps entre T1 et T2 ont significativement diminué ($F(1,33) = 24,0$ $p < ,000$). Les temps entre T1 et T2 sont significativement diminués ($F(1,33) = 24,0$ $p < ,000$) et cette diminution s'observe toujours en T3 ($F(1,33) = 31,3$ $p < ,000$). Les différences entre T2 et T3 ne sont pas significatives.

Les performances de discrimination auditive s'améliorent également avec l'entraînement, ($F(2,33) = 6,4$ $p < ,001$). Les performances sont meilleures en T2 qu'en T1, ($F(1,33) = 12,49$ $p < ,001$) ainsi qu'en T3 par rapport à T1 ($F(1,33) = 5,27$ $p < ,03$). Elles chutent légèrement entre T3 et T2 mais cette différence n'est pas significative. Les temps de réalisation des exercices diminuent également significativement, $F(2,33) = 3,5$ $p < ,039$. Les comparaisons planifiées précisent que la significativité porte sur la différence entre T1 et T2 ($F(1,33) = 5,8$ $p < ,02$) mais aussi entre T1 et T3 ($F(1,33) = 4,8$ $p < ,03$).

En ce qui concerne l'analyse de scènes auditives, l'entraînement produit également un effet significatif, $F(2,33) = 3,78$ $p < ,03$). Les performances dans ces exercices augmentent après apprentissage mais cette différence n'est significative que lorsque l'on compare T3 et T1 ($F(1,33) = 7,15$ $p < ,01$). L'entraînement auditif ne se traduit pas ici par une augmentation de la vitesse de réalisation des exercices.

L'entraînement auditif se traduit enfin par une augmentation des scores dans les exercices de mémorisation ($F(2,33) = 24,03$ $p < ,000$) qui se manifeste notamment par une forte augmentation entre T1 et T2 ($F(1,33) = 30,18$ $p < ,001$). Par contre, cet effet de l'entraînement ne persiste pas, puisque les performances chutent significativement 6 mois après n'entraînement ($F(1,33) = 41,08$ $p < ,001$). Il n'y a plus alors de différence significative avec la performance initiale en T1. L'entraînement se traduit également par la rapidité dans la réalisation, ($F(2,33) = 8,9$ $p < ,001$ qui est principalement du à une augmentation de la vitesse entre T1 et T2 ($F(1,33) = 14,17$, $p < ,001$, qui persiste en T3.

Figure n°2 : Graphique de l'évolution des performances auditives



4. Discussion générale et conclusion

Cette étude avait pour objectif d'évaluer l'efficacité d'un entraînement auditif de 20 séances chez des enfants déficients auditifs proposant, dans un même programme réparti dans le temps, toutes les opérations cognitives du traitement auditif, une grande variété de stimuli (en particulier des stimuli musicaux), dans une procédure d'apprentissage implicite, c'est-à-dire en détournant l'attention des enfants des objectifs thérapeutiques vers des tâches ludiques.

L'évolution des scores et des temps entre le pré-test (T1) et le post-test (T2) suggère que les enfants ont bénéficié favorablement de l'entraînement auditif auquel ils ont été soumis. Ainsi, des enfants de 8 à 10 ans, chez lesquels aucune modification audiolgique n'a été apportée, peuvent améliorer leurs performances auditives (et leur temps de traitement) grâce à un entraînement court (20 séances d'une demi-heure environ). Cependant, l'analyse par tâche démontre une hétérogénéité des scores selon les tâches et donc un profil d'évolution par tâche différent. Ces résultats sont congruents avec ceux obtenus par Wright et Sabin (2007) qui soulignent que, chez les adultes, certaines tâches perceptives sont plus longues à maîtriser que d'autres. Bien que notre expérience ait été menée auprès d'enfants, rien ne nous permet d'affirmer que la maîtrise des tâches perceptives s'opère différemment chez les sujets plus jeunes. Ainsi, en T1, les scores en mémoire auditive apparaissent nettement inférieurs aux scores plus homogènes obtenus aux autres tâches. Cependant, après l'entraînement auditif, les performances des enfants ont fortement augmenté, c'est-à-dire à un empan de 5 unités, ce qui correspond à la norme des enfants de leur classe d'âge.

En T3, nous avons observé un comportement variable des scores : certains résultats ont été maintenus, en terme de scores et de temps (identification et discrimination) tandis que d'autres ont été maintenus au prix d'un temps de traitement allongé (analyse de scènes auditives) ou bien encore les scores ont chuté alors que les temps sont comparables entre T2 et T3 (mémoire auditive). Les opérations perceptives entraînées avec ce programme peuvent être séparées en 2 niveaux : identification et discrimination, qui constituent des opérations cognitives de « bas niveau », requièrent peu de ressources cognitives. Elles sont disponibles à un stade très précoce du développement et ont été largement explorées chez les nourrissons. A l'inverse, l'analyse de scènes auditive et la mémoire auditive constituent les opérations de « haut niveau » et apparaissent plus tard au cours du développement. Nous sommes ainsi tentés de suggérer que pour augmenter les performances des enfants présentant une déficience auditive sévère ou profonde dans les opérations perceptives simples, une durée d'entraînement de 20 séances hebdomadaire est suffisante, tandis que les opérations plus complexes nécessitent, un temps d'apprentissage plus long qu'il conviendrait de préciser dans une étude ultérieure.

Cette étude ne permet pas de rendre compte de l'évolution du comportement des enfants face aux tâches proposées. Cependant, chez les enfants sourds profonds qui ont un usage quasi exclusif de la langue des signes, l'intérêt pour le sonore est limité. Ainsi, au début de l'entraînement, plusieurs d'entre eux se sont montrés limités dans leur coopération, voire rebelles. Au fil des séances, peut-être par sensibilité à l'aspect ludique de la méthode, ils ont manifesté un attrait de plus en plus marqué pour les jeux proposés et la qualité de leur participation a nettement augmenté. Nous pensons donc qu'il serait intéressant de mesurer également l'évolution des aspects qualitatifs du comportement des enfants.

Une autre limite réside également dans le fait que nous ne pouvons pas mesurer la part incombant à l'utilisation des stimuli musicaux, bien que les enfants aient manifesté un intérêt particulier pour ces sources sonores. Une autre étude en cours devrait nous permettre de mieux en saisir les effets.

Article 2: Long-term effects of deaf children's auditory training

Françoise Rochette & Emmanuel Bigand
The Neurosciences and Music III: Disorders and Plasticity: Ann. N.Y. Acad. Sci.
1169: 195–198 (2009).

Abstract: Despite new technological advances in the rehabilitation of audition in profound deaf children, auditory training stays a fundamental stage in their education. Consequently, it appears necessary to study what kind of stimuli, what kind of auditory tasks and what kind of learning procedure generate faster and the most stable benefits. The present study evaluates a training program including numerous non-linguistic stimuli that tap into several cognitive processing. The program rests on an implicit learning procedure and was tested with 6 severe or profound deaf children. The first results demonstrate an improvement of non-linguistic performances on both accuracy and processing times. This was found immediately after the auditory training, and most of the effects remain stable 6 months after. Moreover, children present a better discrimination of linguistic sounds. These results open new approaches in speech therapy.

Key-words: auditory training; transfer of learning; deaf children

1. Introduction

Despite remarkable advances in the field of auditory rehabilitation in deaf children, like cochlear implants, benefits are indeed variable. Several factors are well identified: intrinsic factors (intelligence, socio-economic variables) and age of implantation effect. The organization of the auditory cortex is indeed linked to auditory experience [1] - [2]. Thus, children implanted at an early age perform like their hearing peers in different preverbal skills [3], in music processing [4] and in language abilities [5]. In later implanted children, auditory training stays fundamental and must start as soon as transmission of sounds is possible. Auditory training is known to produce neural plasticity, and shown for adult musicians at the cortical level [6] and at the brainstem level [7] or for children with language impairments [8]. We may assume that auditory training would have similar positive effects in deaf children, however, studies investigating this issue are rare [9]. To work out an auditory program, 4 types of questions have to be considered : 1) what kind of stimuli to use, do simple or complex stimuli provide the best auditory benefits? Are linguistic or non-linguistic the most relevant? 2) How long should an auditory training last? 3) What kind of learning procedure to use? Is explicit learning more efficient than implicit learning in deaf children? 4) Which tasks are necessary? Do simple or complex tasks allow better performances in language skills? [10].

In the present study, we used four categories of auditory stimuli (environmental sounds, music, voices and abstract sounds), in an implicit learning program that was designed to tap into four main auditory processes [11]. The study aimed to assess the possibilities of

transfer to untrained linguistic tasks like phonetic discrimination. Children were notably asked to evaluate the similarity of two items that were differing or not in one phonetic dimension (oral vs. nasal vowels, voiceless or voiced consonants).

2. Method

2. 1. Participants

Four profound and 2 severe deaf children (mean = 9 years old) participated in the study. Five of them benefit of a bilingual (French Sign Language/ spoken language) education but were poor speakers. One child was LSF user. During the experiment, no new tuning has been made and the children followed their usual schooling and therapies. Parents or caregivers have been informed about the experiment and have given a written consent.

2. 2. Material

The experiment was realized with a platform of 4 games, designed to tap into the 4 main auditory processing :(identification, discrimination, Auditory Scene Analysis (ASA), auditory memory. The platform was connected to a computer and worked with a self-made software called “sounds in hand”. Four categories of sounds were used: environmental sounds, voices, music and abstract sounds.

2. 3. Procedure

Children were invited to interact with the sounding platform for 1 half-hour session weekly (20 weeks). Two auditory games were played in a funny way during each session and we assumed that the games would allow an auditory implicit learning. In the identification task, children stood in front of the keyboard and had to match figurines corresponding to the presented sound. In the discrimination task, the children introduced a magnet in a hole. The polarity of the magnet may change or not a single characteristic of the sound that was the tempo, the pitch or the timbre. In the ASA task, each hole of the checkerboard was filled with a magnet checker. At the beginning of the game, an auditory scene containing 2 or more streams was presented. Moving some of these magnets removed one of these streams. The memory task was a span task, run with the keyboard. Participants should reproduce a short sequence of 2 to 5 sounds. During the course of the program, the difficulty of the four games was increased by crossing the complexity of sounds (from environmental sounds to abstract sounds) and the complexity of tasks (from identification to memory). This procedure allowed a progressive increase in difficulty and a stimulating variability of the contents of the auditory games.

2. 4. Experimental design

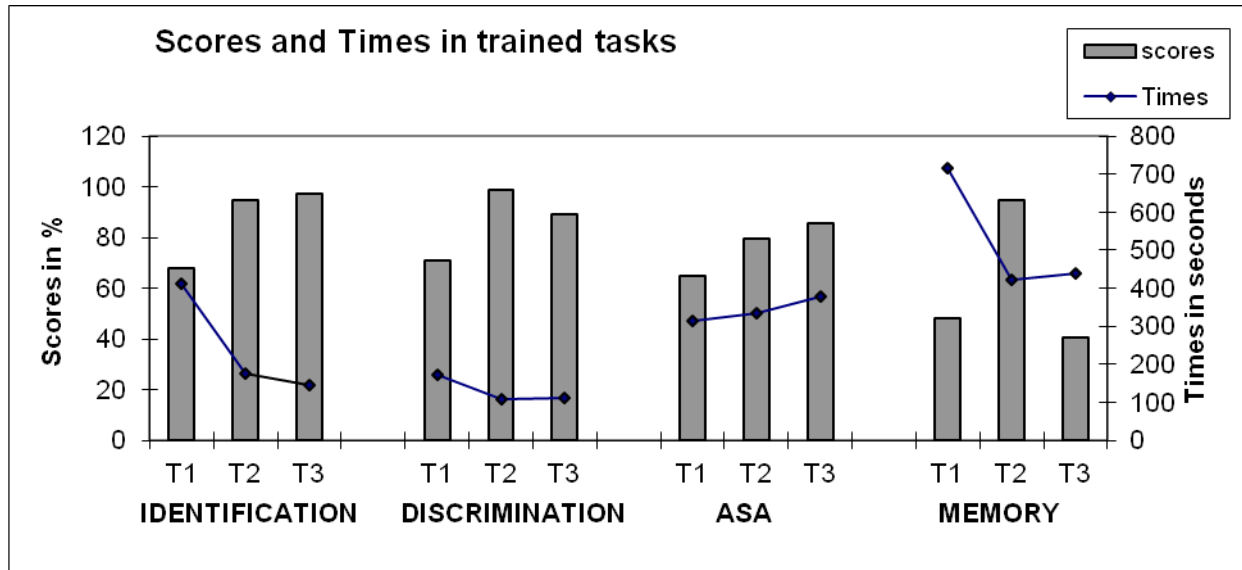
Before the study, the children performed a pre-test session that evaluated (1) their performances (accuracy and speed) with some auditory games of the training program, and (2) their performance in a phonetic discrimination test (that was not trained by this method). This test involved a similarity judgment. It was composed of 36 items opposing oral vs. nasal vowels, voiced and voiceless consonants in mono and bisyllabic non-words. The pre-test (T1)

was replicated just after training (T2) and 6 months later (T3). We expected better performances on T2 (compared to T1) and similar performance between T2 and T3.

3. Results

The figure n° 1 shows the accuracy and processing times for each task before, just after and 6 months after training.

Figure 1: scores and processing times in trained tasks (3 periods of measurement T1 = before training, T2 = after training, T3 = 6 months later).

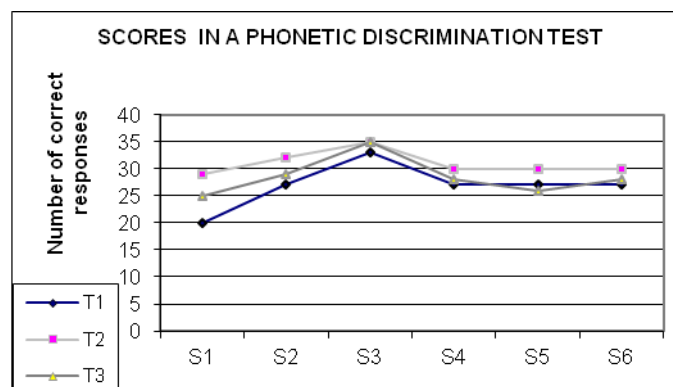


In the identification task, an ANOVA reflected a main effect of period of test ($F(2, 33) = 18.32$; $p < 0.0001$). Performances were higher in T2 and T3 compared with T1 ($F(1, 33) = 25.12$; $p < 0.0001$ and $F(1, 33) = 29.64$; $p < 0.0001$). The difference between T2 and T3 was not significant. The ANOVA showed also a main effect of processing times. Times between T1 and T2 decreased significantly ($F(1, 33) = 24.0$; $p < 0.0001$). This decrease was also observed in T3 ($F(1, 33) = 31.3$; $p < 0.0001$). Differences between T2 and T3 are not significant. Training led to an improvement of performances in auditory discrimination ($F(2, 33) = 6.4$; $p < 0.001$). Performances were higher in T2 than in T1 ($F(1, 33) = 12.49$; $p < 0.001$) and in T3 than in T1 ($F(1, 33) = 5.27$; $p < 0.03$). The short decrease observed after T2 was not significant. Processing times decreased significantly ($F(2, 33) = 3.5$; $p < 0.039$), between T1 and T2 ($F(1, 33) = 5.8$; $p < 0.02$) and between T1 and T3 ($F(1, 33) = 4.8$; $p < 0.03$). The performances to the ASA task improved but the difference reached statistical significances only between T1 and T3, ($F(1, 33) = 7.15$; $p < 0.01$). There was no effect of training on processing times. Auditory training resulted in an improvement of scores in the memory task ($F(2, 33) = 24.03$; $p < 0.0001$) with an increase between T1 and T2 ($F(1, 33) = 30.18$; $p < 0.001$). However, this effect did not persist in T3. The training involved also reduced processing times ($F(2, 33) = 8.9$; $p < 0.001$), which was found between T1 and T2 ($F(1, 33) = 14.17$; $p < 0.001$) and which remained stable in T3.

Figure 2 shows the scores for each participant to the phonetic discrimination test. The auditory training resulted in an improvement of the performances to the phonetic

discrimination test, between T2 and T1 (t-paired sample test ($t(17) = 5.11$; $p < 0.000$) and between T3 and T1 ($t(17) = 2.4$ $p < 0.02$).

Figure 2: Scores obtained in the phonetic discrimination test for each participant.



4. Discussion

The change in performance between T1 and T2 demonstrates that children were able to improve their auditory performances even in the absence of any technological tuning in their hearing aids. This suggests that they gained benefits from auditory training over a rather short period. It may be argued that the absence of a control group does not allow disentangling the specific effect of the training program used from those of the usual schooling and therapies. However, the fact that performances did not continue to improve between T3 and T2 suggests that the usual schooling and therapies were not responsible of the improvement between T1 and T2. Several informal observations suggested that an ecologically valid and stimulating auditory program increased the motivation of children for sound processing which results in an overall improvement of performances. The most striking finding was to show that auditory training had positive side effect on the phonetic discrimination test which was not trained. These results open new perspectives in speech therapy. Phonetic differences are indeed fundamental in speech reception and are usually regularly trained in deaf children. The redundancy of the task considered as essential is boring. As non-linguistic stimuli allow an improvement of linguistic performances, it appears possible to avoid the repetitiveness of phonetic material.

Article 3: Auditory training improves auditory performances in cochlear implanted children

Françoise ROCHETTE (1), Stephane ROMAN (2), Jean-Michel TRIGLIA (2) & Emmanuel BIGAND (1) & (3)

(1) LEAD-CNRS UMR 5022 – Université de Bourgogne – DIJON (France)

(2) ORL Service - Pediatric Hospital La Timone – MARSEILLE (France)

(3) Institut Universitaire de France

Abstract: The aim of this study was to evaluate the effect of an auditory training in profoundly deaf children cochlear implant recipients on trained tasks and transfer effect on phonetic discrimination. Nineteen children ages from 4 to 10 participated to the study, pseudo-randomly assigned to the experimental or the control group. They were shared in two sub-groups (younger from 4 to 7 year-olds and older from 8 to 10 year-olds). The auditory training “Sounds in Hands” lasted 16 weeks, one half-an-hour session weekly. Results indicated a strong effect of training modulated by age and age of implantation.

Key-words: Deaf children, cochlear implant, auditory training, transfer effect.

1. Introduction

Cochlear implants stimulate electrically the auditory fibers in the modiolus. This device is widely used to rehabilitate the transduction of sounds in profoundly deaf children. Several studies have reported positive benefits of pediatric cochlear implantation on language perception skills (Houston, Pisoni, Kirk, Ying, & Miyamoto, 2003) in intelligibility (Baudonck, Dhooge, & Van Lierde, 2010) and voice monitoring (Seifert et al., 2002). Several factors are relevant to predict benefits of cochlear implant on linguistic abilities (for a review see Peterson, 2010). Intrinsic factors as gender, IQ, socio-economic status, age of onset of hearing-loss, or associated disabilities may predispose children in better or poorer outcomes with their implant. Conversely, therapeutic interventions are available on modifying extrinsic factors (age at implantation, educational mode and classroom placement (Geers et al., 2007; Tobey, Reckart, Buckley, & Geers, 2004) and may play an important role in the variability of the observed outcomes. However, fine-grained perceptive difficulties in various domains are observed, as phonetic contrasts (Leybaert & Charlier, 1996; Transler, Leybaert, & Gombert, 1999) or music processing and suggest the importance of auditory training. The common approach comprises two steps: to process the acoustical characteristics of sounds (as

frequency, timbre, and loudness) followed by linguistic items (phonemes, syllables, words) presented through discrimination and identification tasks.

Researches in cognitive sciences in the domain of audition have determined several perceptive processing operations and their interactions (McAdams & Bigand, 1994). Transduction remains on the physiologic properties of our peripheral auditory organs (specific coding of acoustic features of the auditory source). Processes of auditory grouping carry out fusion and/or segregation of simultaneous auditory features of one mixture into organized and successive auditory events (Bregman, 1990). This step (also labeled auditory scene analysis) is essential to perceive for example the number of auditory objects present in the source, or to determine the apparition of a new event. If such analysis remains on ascending processes, top-down processes (schemas) could contribute in the identification of familiar sounds in noisy situation (cocktail-party). Micro- and macro-temporal properties of the auditory source are then analyzed and give information on structural invariants and their transformations, indicating what happens at the level of the auditory object. These abstract properties are compared to representations stored in memory. Such process allows not only discrimination (at least short-term storage is required in a same-different procedure) but the activation of a representation stored in long-term memory and their semantic associations. Thus, auditory memory plays a major role in the formation of auditory representations. As auditory events are sequentially in essence, to store information in order is a pre-requisite to establish links between events (e.g. understanding syntax).

These operations are not trained in the usual therapeutic interventions in deaf children. However, as they constitute fundamental basis in auditory cognition, their development should imply general benefit in auditory processing.

Auditory training is known to produce anatomical and functional neural plasticity, as it has been shown in adult musicians (Pantev, Oostenveld, Engelien, Bernhard et al., 1998; Pantev et al., 2001; Pantev et al., 2003; Schlaug et al., 1995 (b); Shahin, 2007) and in children (Schlaug et al., 2005). Experience modulates the development of new functional synapses (Kral, Tillein, Heide, Hartmann, & Klinke, 2005). As neural plasticity depends highly on the trained tasks (Polley, Steinberg, & Merzenich, 2006), we have worked out an auditory training program designed for children aged from 4 to 10 years that stimulate implicitly the general cognitive operations involved in auditory processing through four games (identification, discrimination, auditory scene analysis (ASA) and auditory memory and four type of sounds (environmental sounds, music, voices and abstract sounds) . Our program ensures a progressive level of difficulty, crossing the difficulty of the tasks (from identification and discrimination to ASA and memory) and the difficulty of the sounds (from environmental sounds to abstract sounds). This protocol has been tested in 6 severely and profoundly deaf children. Positive benefits have been reported, in an improvement of performances in trained tasks but merely in phonetic discrimination that was not trained.

As auditory performances in implanted children (aural-oral educated) are reported enhanced compared to hearing aids fitted bilingually educated children, the present study has been led to assess whether deaf cochlear implanted children would also improve auditory performances in trained tasks and whether they could develop the same transfer of learning than bilingual children to the phonetic discrimination test. Secondly, as the trained tasks differ in term of difficulty, we expected, over periods of testing, significant improvements in the tasks requiring a higher cognitive level (ASA and memory). The third aim of this study was to characterize of the effect of age and the effect of age at implantation on performances on the different tasks tested (trained and untrained tasks).

2. Method

2.1. Participants

Nineteen prelingually profoundly deaf children (4 to 10 year-olds) have been recruited in the ORL Pediatric Service, Hôpital de la Timone in Marseille, ensuring the follow-up of the children since the diagnosis of deafness. They were separated randomly in 2 paired groups: experimental group (n=10, mean age = 7.65, (SD = 1.89) that has been trained, and a control group (n=9, mean age = 7.1 (SD = 2.69) that was not trained. All of them are cochlear implant recipients. The children came from normal-hearing families and were enrolled in an auditory verbal educational program. They were French native language users. Details of the demographic information are provided in Table 1. Parents have been previously informed and have given their written consent. This study was approved by the Ethics Committee of the Hospital.

Table 1: Demographic data of participants (ACE: high rates of stimulation (600-1800 pulses/s) with dynamic electrode selection and a large number of available electrodes, improving the transmission of temporal and spectral speech information).

		Sex	Age	Age at Implantation	Implant duration	Type implant	Schooling
Experimental Group	S1	M	4,8	26	28	nucleus	Mainstream
	S2	F	5,3	35	34	nucleus	Mainstream
	S3	F	5,3	50	14	nucleus	Mainstream
	S4	F	10	35	85	nucleus	Partial integration
	S5	M	9,2	27	65	nucleus	Mainstream
	S6	M	7,7	17	74	nucleus	Mainstream
	S7	M	9	42	65	nucleus	Mainstream
	S8	F	7,8	27	64	nucleus	Partial integration
	S9	F	9,4	37	74	nucleus	Partial integration
	S10	M	8	60	34	nucleus	Mainstream
Mean			7,65	35,6	53,7		
SD			1,79	11,97	23,99		
Control Group	S11	M	6,11	16	67	nucleus	Mainstream
	S12	M	6,4	37	38	nucleus	Mainstream
	S13	F	6,4	41	34	nucleus	Mainstream
	S14	M	4	17	30	nucleus	Mainstream
	S15	F	6,6	51	15	freedom	Mainstream (delayed)
	S16	F	4,1	17	40	freedom	Mainstream
	S17	M	8,11	39	67	freedom	Partial integration
	S18	M	10,1	85	36	freedom	Partial integration
	S19	M	11,6	30	108	nucleus	Mainstream
Mean			7,05	37	48,33		
SD			2,53	21,82	27,92		

2.2. Material and procedure

The experiment employed the same material than our previous study (Rochette & Bigand, 2009). A sounding platform stimulated the four main auditory means of processing (identification, discrimination, Auditory Scene Analysis [ASA], and auditory memory) through four games. The platform was connected to a computer and worked with a self-made

software called “sounds in hand.” Four categories of sounds were used: environmental sounds, voices, music, and abstract sounds. Children of the experimental group were invited to interact with the sounding platform according to a progressive increase of difficulty in crossing the complexity of sounds (from environmental sounds to abstract sounds) and the complexity of the tasks (from identification to memory). Each weekly session lasted half of an hour and consisted of the practice of two items x two tasks. The complete program was spread over 16 weeks. Each game began with a familiarization phase. The identification task required the keyboard. The children had to match pictures to the presented sound by pressing one of the six available keys. In the discrimination task, the children introduced a magnet in a hole. The polarity of the magnet may (or not) change one characteristic (tempo, pitch, timbre) of the sound. The ASA task was performed with the checkerboard that was filled with magnets. An auditory stream composed of two (and later three) auditory sources were presented continuously. Removing a magnet may switch off (or not) a sound. The memory task was a span task. The children have to reproduce a sequence of two to five sounds, using the keyboard.

2. 3. Experimental design

The experiment included two phases: 1- During the first part of the experiment, children of the group 1 followed the training (experimental trained group) while children of the second (untrained) group constituted the control group. 2 – For the second part, group 2 received the training while the group 1 became control group. Three periods of measurements were thus determined for both groups: before the first phase of training, to determinate a baseline of their performances, after the first and the second phase of training (between experimental and control groups and within each group).

Before the beginning of the experiment, the children underwent a medical consultation and a tuning of their device. During the experiment, no additional tuning has been led. Children of both groups followed their usual therapies. Auditory performances were measured for both groups at two times of the study: before the beginning of the training (pre-test) and after the training (post-test). To assess the effect of training on trained tasks, we have worked out a testing material using the same material (Sounds in Hands platform) and tasks of our training program but different sounds of the category “environmental sounds”. The four auditory tasks were identification, discrimination, Auditory Scene Analysis and Auditory memory. We have calculated the scores according 2 points if the child produced spontaneously a hit, 1 point if a repetition of the target was required (forgotten or incorrect item) and 0 in case of error after repetition of the target. To prevent the deduction of the last item in the identification task, we practiced 7 trials (using the 6 keys of the keyboard) but scored 6 out the 7 trial (maximum: 12 points). The discrimination task comprised 12 trials and 24 for the ASA task (respectively 24 points and 48 points). Memory task was presented from 2 items to five items (2 trials) and stopped after 2 failures (maximum 16 points). Children performed also the phonetic discrimination test used in our previous study (Rochette & Bigand, 2009). This test composed of 36 items involved a “same/different” judgment, opposing oral versus nasal vowels, voiced and voiceless consonants included in mono- and bi-syllabic nonwords. To compare the scores to the different tasks, we have calculated a percentage of correct responses. After training, parents were asked to evaluate their children’ motivation and enjoyment with a five points scale (see Questionnaire, annex 1).

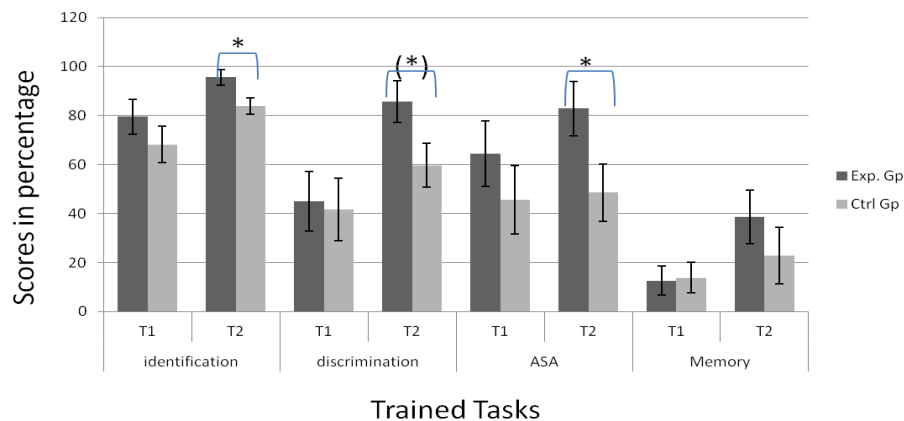
3. Results

We have analyzed separately the scores obtained to the trained tasks (identification, discrimination, ASA and auditory memory) and the effect of transfer to the untrained task (phonetic discrimination). In the aim to compare each group and subgroups performances, we have conducted a 2 (groups) X 4 (tasks) X 2 (periods of tests) X 2 (age) x 2 (age at implantation) ANOVA. The distribution subgroups “age” and “age at implantation” is referred further. We observed a main effect of the period of testing ($F(1, 11) = 34.93$, $P < .001$). We observed also a main effect of the task ($F(3, 33) = 53.97$, $P < .001$), a main effect of age ($F(1, 11) = 22.19$, $P < .001$) and a main effect of age at implantation ($F(1, 11) = 5.03$; $P < .05$). We observed an interaction period x group x age at implantation ($F(1, 11) = 5.09$; $P < .05$).

Effect of training

We have compared the difference between groups before and after training for each trained task and in the phonetic discrimination test. We have conducted analysis of the differences between and within groups for each task. Even if in averages scores between groups were different in pre-test, none of them were significant. The effect of the training was visible in the significant differences of scores obtained to the different tasks, except in memory task (see Figure 1).

Figure 1: Comparison of auditory performances between groups before and after training (*) for $P < .06$; * for $P < .05$



However, when comparing the evolution within each group, we found that the improvement of the performances were trendy or significant only in our trained group in each task: identification ($F(1, 17) = 4.44$; $P = .051$), discrimination ($F(1, 17) = 18.95$; $P < .001$), ASA ($F(1, 17) = 4.71$; $P < .05$) and Memory ($F(1, 17) = 8.81$; $P < .01$) but not significant within controls. Effect of period on untrained task is reported separately.

Tasks

Taken together, the scores obtained by both groups whatever the period of testing, are strongly related to the tasks. The higher scores displayed in the identification task were significantly different of those in the discrimination task ($F(1, 11) = 19.89$; $P < .001$), in the ASA task ($F(1, 11) = 11.88$; $P < .006$) and the memory task ($F(1, 11) = 178.62$; $P < .000$).

Differences between the discrimination and the ASA tasks were not significant but differed from memory (respectively $F(1, 11) = 48.17$; $P < .000$ and $F(1, 11) = 62.35$; $P < .000$).

Scores obtained to the different tasks are also highly related to the age of the children. Further details are provided in the next section.

Effect of age

The groups were divided in “Younger” ($M = 5.13$ y. (0.29) for the experimental group and 5.6 y. (1.21) for the controls and “Older” ($M = 8.73$ y. (0.89) for the experimental group and $M = 9.93$ (1.75) for the Controls, according to their performances in pre-test. Taken the performances of both groups to each task, whatever the period of testing, the older children displayed higher performances than younger children. For all the tasks, the difference between older and younger were significant: identification ($F(1, 15) = 8.97$; $P < .01$); discrimination: ($F(1, 15) = 9.64$; $P < .01$); ASA: $F(1, 15) = 15.55$; $P < .005$); Memory: ($F(1, 15) = 31.35$; $P < .001$).

To understand in details the effect of age in the evolution of our groups, we have also compared the scores obtained by each subgroup (younger vs. older children) before and after training. Details are provided in Table 2

Table 2: Comparison of auditory performances between groups by age; Range age for Younger children = [4; 7[, and [7; 10] for older children; () for $P < .1$; * for $P < .05$; ** for $P < .01$; *** for $P < .001$*

			Experimental Group			Control group			Exp/CtrlGp
			T1	T2	Within-subgroup significativity	T1	T2	Within-subgroup significativity	
Identification	Younger	n = 3	66,33	94	(*)	n = 6	59,5	78,83	(*)
	Older	n = 7	85,29	96,33	NS	n = 3	85,67	94	NS
	Between sub-groups significativity		NS	NS		(*)		*	
Discrimination	Younger	n = 3	25	57,67	(*)	n = 6	27,78	46,39	NS
	Older	n = 7	53,57	97,62	**	n = 3	69,44	86,11	NS
	Between sub-groups significativity		NS	**		NS		*	
ASA	Younger	n = 3	29,17	68,05	*	n = 6	23,96	24,99	NS
	Older	n = 7	79,76	78,19	NS	n = 3	88,83	95,86	NS
	Between sub-groups significativity		*	NS		*		**	
Memory	Younger	n = 3	0	6,25	NS	n = 6	0	5,21	NS
	Older	n = 7	17,98	52,68	***	n = 3	41,66	59,33	NS
	Between sub-groups significativity		*	**		***		*	

In the identification task, the trained younger children displayed a trendy improvement of their performances ($F(1, 15) = 3, 81$; $P < .07$) leading to a significant difference between experimental and control subgroups. The differences within and between older children remained not significant. In the discrimination task, the means of the experimental younger children were higher after training than those of the controls even if the differences between groups stayed non significant. Conversely, the training benefited highly to older children who reached a significant difference of means after training. In the ASA task; older children are dramatically more efficient than younger children but the younger subgroup displayed a significant improvement of the scores although the scores stayed equal

in the controls. After training, the mean of the trained younger children was significantly different of those of the younger controls. Auditory memory remained a very difficult task for the younger children and despite the training sessions, scores remained stable. Differences that were significant between older children of both groups became non significant after training.

Effect of age at implantation

To evaluate the effect of age at implantation, we have separated children implanted before the age of 30 months (Sharma, 2002) and those implanted later. Taking together periods of testing, we found a difference between early and later implanted children in the process of the memory task ($F(1, 11) = 6,08$; $P < .03$) but not for the other trained tasks.

When comparing the subgroups of early (before the age of 30 months) vs. later implanted children, we found differences in the performances of the children of both groups. Results are shown in Table 3. In average, performances of early implanted children in both groups were higher than those of later implanted even if differences of means appeared mostly non significant. Positive effects of the training were particularly remarkable in later implanted children whose scores after training reached those displayed by early implanted children. Moreover, early implanted children improved trendy their mean in only one task (memory), later implanted children increased their scores in all tasks.

Table 3: Comparisons of performances between groups $\times$ age of implantation (*) for $P < .08$; * for $P < .05$; ** for $P < .01$; *** for $P < .001$

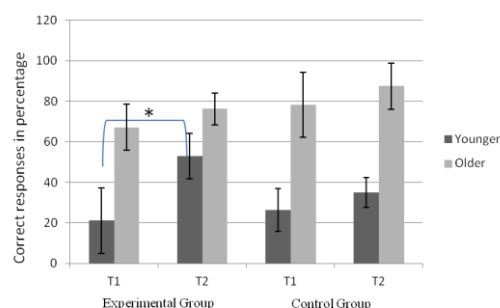
			Experimental Group			Control group					
			T1	T2	Within-group significativity			T1	T2	Within-group significativity	Exp/CtrlGp Significativity in T2
Identification	Early imp.	n = 4	89,25	95,5	NS	n = 4	56	89,25	**	*	
	Later imp.	n = 6	73,17	95,72	*	n = 5	78	79,6	NS	NS	
	Between sub-groups significativity		NS	NS		NS		NS			
Discrimination	Early imp.	n = 4	70,83	91,5	NS	n = 4	58,33	61,33	NS	NS	
	Later imp.	n = 6	27,78	81,72	***	n = 5	28,33	58,26	*	NS	
	Between sub-groups significativity		(*)	NS		NS		NS			
ASA	Early imp.	n = 4	82,29	92,71	NS	n = 4	59,89	61,45	NS	(*)	
	Later imp.	n = 6	52,78	76,25	(*)	n = 5	34,17	38,33	NS	NS	
	Between sub-groups significativity		NS	NS		NS		NS			
Memory	Early imp.	n = 4	20,96	46,88	(*)	n = 4	13,39	32,81	NS	NS	
	Later imp.	n = 6	7	33,33	*	n = 5	14,28	15	NS	NS	
	Between sub-groups significativity		NS	NS		NS		NS			

Effect of transfer: phonetic discrimination

To assess our hypothesis of an effect of transfer from general auditory abilities to linguistic task, the pre-test (T1) and post-test (T2) sessions included a phonetic discrimination test. A repeated measure ANOVA has been conducted. We obtained a main effect of period ($F(1, 15) = 11.18$; $P < .006$) and a main effect of age ($F(1, 15) = 12.18$; $P < .005$) but no effect of age at implantation. Performances were significantly improved in our experimental group ($F(1, 15) = 12.76$; $P < .003$) when Controls did not ($F(1, 15)$; $P > .15$). Such effect is mainly due to younger children of our experimental group who displayed a significant difference

between the two sessions of measures ($F(1, 15) = 11.02$; $P < .01$) when increase of performances in the experimental older children subgroup was not significant.

Figure 2: Percentage of correct responses to the phonetic discrimination test between and within subgroups



Questionnaire

The responses of parents were very homogeneous. They all rated the motivation and the enjoyment of their child between “high” and “Very high” and expressed their wish to participate to use the platform at home if a commercial version was produced.

4. Discussion

Effects of training

The comparison between and within groups before and after training allowed to establish the effects of the training and those of the natural evolution of the children. In the first session of testing, the scores between groups were not totally equal but the differences were not significant. As expected, we have observed after training significant improvements of performances in the trained group for each task when the improvements of means were not significant in controls. These results suggest that our experimental group benefited of the training, even if the differences between groups demonstrated just a trend. We can argue also that the scores in post-test reflected not only the “natural” evolution of the children but for a certain amount an effect of procedural learning of the situation of test. Even if deaf cochlear implanted children have been identified to perform better than hearing aids fitted children in several auditory tasks, our results suggest that a training based on general auditory processes could improve rapidly their general auditory performances.

Tasks

As expected, the four trained tasks were not equal in terms of difficulty for the children of both groups. These results are not surprising. Identification and discrimination are considered as low-level auditory tasks compared to ASA and memory. Identification and discrimination were the tasks for which children of both groups and sub-groups obtained the higher performances. An effect of practice could be involved as identification and discrimination are cognitive tasks commonly used in speech-therapy, including different kinds of sounds or sounds features. Children are thus much familiarized with this task. To perform the ASA task, discrimination abilities are required. When a pawn is removed from a hole, one of the auditory sources is (or not) eliminated. In practice, children could process in comparing continuously if the acoustic signal produced by the platform were or not the same than previously heard. The possibility for them to replace and remove again the pawn facilitated the discrimination of the acoustic differences in the signal. Discrimination is also a

very familiar task for the children as they are continuously trained in the course of their common speech-therapy. Auditory memory constitutes the most difficult task for the children. As they have to maintain in working memory the sequence of sounds previously presented, this task requires not only to identify the different sounds but the order of the sequence.

These results are congruent with those obtained in a previous study Rochette & Bigand, 2009 but our experimental group that were older in average, displayed less differences between the identification and the discrimination task. Memory was also the most difficult task to realize.

Effect of age

Not surprisingly, older and younger children displayed significant different scores in the totality of the trained tasks. We found differences related to the tasks. Best benefits were found in the identification task for younger than for older children. In the one hand, we can argue an effect of duration of use of the device that has been identified in numerous studies (De Raeve, 2010; Geers et al., 2007; Most & Peled, 2007). The auditory performances of the children are linked with the length of use. In the other hand, older children who have been trained to this cognitive task during several years and displayed at the beginning of the experiment high scores (plateau effect) that could not improve dramatically. Younger and older children vary also in the type of process: to master correctly the testing tasks implies to pay attention to spectral and temporal features of sounds. Generally, the younger children failed to recognize properly in the identification (and the discrimination tasks), the items that differed in frequency but presented similar patterns of rhythm. Younger children seemed thus more sensitive to temporal than spectral information and commit confusions between items that were similar in rhythm. Older children seemed more efficient than younger to process at the same time the relevant features of sounds useful to achieve the tasks. However, younger children of our trained group reached the scores of the older and demonstrated rapid capacities of learning. To perform the task, younger and older differed in their strategies: older children used the verbal label of the items that are presented and have memorized the positioning of the sound during the phase of familiarization. The younger children processed in trying the different keys of the keyboard until recognition.

In the discrimination task, both younger and older children of our experimental group improved their performances. Older children were more capable than younger to process in the same time spectral and temporal features of sounds could display better benefit than younger from the auditory training. However, the trained younger children seemed to apply this ability as their improvement in the ASA task suggest. To perceive accurately if one auditory source is or not removed, one must master the acoustic properties of the source and isolate each component (fusion/segregation Bregman, 1990). The stability of the scores in the younger controls and the difference between younger and older children could indicate that this cognitive operation depends mainly on age but is sensitive to training. This data is of great importance as young children could link auditory events and develop other cognitive abilities like causality.

At least, memory task appeared not surprisingly very difficult for younger children, and experimental younger children did not present improvements of performances. In fact, younger children were sensitive either to primacy or recent effect. The strategy that they used in the identification task that was to try the different keys of the keyboard led to interferences. Conversely, older children presented alternatively or simultaneously two strategies: they used verbal label of the items (or the number of the key) to maintain the target in working memory through subvocal repetition. As they have memorized the keys corresponding to the sounds, they encoded spatially the order of the targets (e.g. in pointing the keys with several fingers).

Effect of age at implantation

Earlier implanted children demonstrated higher performances when compared with later implanted children in all trained tasks in both groups. The effect of training was clearly notable in later implanted children that improved significantly their scores in all trained tasks. However, earlier implanted children of our control group demonstrated improvements in two tasks that were identification and memory. These results are reliable to other studies demonstrating higher perceptive performances in earlier implanted children. Such results can be attributable to the higher plasticity found in young children in relation to auditory experience.

Effect of transfer: phonetic discrimination task

Surprisingly, not both subgroups of our experimental group showed significant improvement in the phonetic discrimination task. Only younger children improved their scores significantly. This finding suggests the potential role of other modalities (visual in lip-reading and cued speech) that are commonly trained in their usual therapies. Phonetic representations in older children should be more multimodal than in younger children.

5. Conclusion

Despite a possible effect of practice advantaging the performances of our experimental group in post-test, our study provides some implications in the education or the therapy in deaf children. First, children fitted with hearing aids (Rochette & Bigand, 2009) or with cochlear implant demonstrated equivalent patterns of progress, it appears important to stimulate all the cognitive operations of the auditory perception.

Second, our finding could suggest acutest therapeutic proposal in pediatric cochlear recipients, providing therapeutic indications related to specific difficulty (e.g. phonetic discrimination) or intrinsic factors (age, age at implantation).

Article 4: Evolution of deaf children's speech after auditory training

Françoise Rochette (1), Stéphane Roman (3), Jean-Michel Triglia (3) & Emmanuel Bigand (1) & (2)

(1) LEAD-CNRS UMR 5022 – Université de Bourgogne – DIJON (France)

(2) ORL Service - Pediatric Hospital La Timone – MARSEILLE (France)

(3) Institut Universitaire de France

Abstract: Voice and speech control are affected by hearing losses. Cochlear implants provide higher control mechanisms in voice and speech production, allowing some of the profoundly deaf children to display Fundamental Frequency (Fo) and intelligibility in the normal range. The objective of this study was to assess if an auditory training may improve control mechanisms of voice and speech. Among 19 profoundly deaf children participating to the study, 10 underwent an auditory training with the program “Sounds in Hands” while the other 9 were the Controls. The results showed that a short period of auditory training modified the control mechanisms, expressed by a lower Speaking-Fo value and an improvement of speech-rate.

1. Introduction

Voice is produced when the vocal folds are maintained in the midline of the glottis and air flow from lungs allowing an increase of the subglottal pressure causes the opening of the vocal folds. The airflow rushes between the folds, allowing a reduction of the pressure between them. Then, the muscular tension in the vocal folds led them to the midline of the glottis for closure. A new cycle is able to begin. These vibrations are thus dependant on a trans-glottal pressure difference and generate a sound wave, secondly filtered and amplified by oral articulators (pharynx, tongue, lips and jaw, and then emitted from the mouth and the nose (voice; Simonyan & Horwitz, 2011). Production of voice implies to control adequate respiratory flow during exhalation and adequate muscular activity within the larynx. Speech implies the planification and an extremely rapid motor control and coordination at the level of larynx for voice onsets and offsets (e.g. for voiced and unvoiced sounds; Ludlow, 2005) and articulators (Tsao & Weismer, 1997).

Recently, using different vocal tasks, neuroimaging studies have localized a laryngeal region within the primary motor cortex, mainly in the Brodmann area 4p closed to the tongue area and in the Brodmann area 6, near the lips area (Brown, Ngan, & Liotti, 2008; Simonyan, 2009; Loucks, 2007). The Laryngeal Motor Cortex (LMC) receives and sends (reciprocal connections) information from numerous regions of the brain (for a review, see Simonyan & Horwitz, 2011), particularly premotor, motor, auditory, somatosensory cortex areas and cerebellum. The Laryngeal Motor Cortex (which is strongly left-lateralized) is connected with the Supplementary Motor Area (SMA), an active structure during several voluntary

laryngeal tasks (Loucks & al. 2007). Interconnections with the Inferior Frontal Gyrus play a role for motor planning of voice and speech production, particularly the pars opercularis in the articulatory preparation (Simonyan, Ostuni, Ludlow, & Horwitz, 2009; Zheng, Munhall, & Johnsrude, 2010).

Laryngeal Motor cortex is activated during several auditory perception tasks, like meaningless syllables (Wilson, Saygin, Sereno, & Iacobini, 2004), depending on the articulatory movements of the phonemes (Pulvermüller et al., 2006). Projections from premotor areas and opercular portion of the inferior frontal gyrus to auditory cortical areas (Brown et al., 2008), help to encode auditory targets for the production of syllables (Tourville, Reilly, & Guenther, 2008). Conversely, auditory cortices show activations during speech production : the right superior temporal sulcus implicated in voice perception (Belin, Zatorre, & Ahad, 2002) is active (Brown et al., 2008). A bilateral activation of the middle and superior temporal gyri have been observed when a manipulated auditory feedback does not match with the expected auditory consequence of the vocal production (Zheng et al., 2010). At least, somatosensory cortex and inferior parietal cortex connections allow integration of proprioceptive and tactile feedback from the orofacial, respiratory and laryngeal regions during voice production. (Loucks, Poletto, Simonyan, Reynolds, & Ludlow, 2007; Riecker, Ackermann, Wildgruber, Dogil, & Grodd, 2000).

Production of voice and speech constitutes a complex motor activity and involves controlling mechanisms. The DIVA model (Direction Into Velocities of Articulators) (Guenther et al., 2006) considers the sensorimotor transformations involved for the control of articulator movements. It includes a feed-forward motor system and a sensory feedback (auditory and kinesthetic). The integration of feed-forward and feedback control mechanisms involves voice F_0 regulation through error-induced corrective commands that update the internal models of the vocal motor system. Feedforward control directs motor planification from previously learned movements. Feedback control ensures the monitoring of the performance during execution, allowing the possibility to minimize errors or deviations from the expected performance through sensory information.

Several studies led in normal-hearing adults provide support to this model. The effects of modifications of auditory feedback have been studied on several vocal behaviors, as increase of intensity in noisy environment (Lombard effect; Bauer, Mittal, Larson, & Hain, 2006; Lombard, 1911). Other studies, using the pitch perturbation technique (modification of the speaker's pitch) showed compensatory vocal responses in the direction opposite to the pitch shifted feedback in the aim to maintain the F_0 at the expected level of pitch in speech (Burnett & Larson, 2002; Chen, Liu, Xu, & Larson, 2007; Donath, Nakte, & Kalveram, 2002) and in singing (Nakte, donath, & Kalveram, 2003). In a sensorimotor adaptation experiment, Houde & Jordan (1998) found that adult speakers could compensate shifts in formant frequencies of their auditory feedback and generalize this behavior to non-shifted vowels in different phonetic contexts (Houde & Jordan, 1998). Laryngeal somatosensory receptors have also been identified to play a role in the control of the voice. The procedures of local anesthetic on the vocal folds led to a decrease of control of F_0 (Larson, Altman, Liu, & Hain, 2008; Sorensen, Horii, & Leonard, 1980). At least, a manipulation in amplitude of the feedback produced an increase of vibrotactile information from lips and throat (Champoux, Shiller, & Zatorre, 2011).

Auditory processing and especially auditory feedback, is supposed dramatically important for the development of articulation in children (Boysson-Bardie, Halle, Sagart, & Durand, 1989), language (for a recent review see Kuhl, 2010, the control of voice (Iyer & Oller, 2008) and speech-rate (Lee, Potamianos, & Narayanan, 1999). The consequences of a disruption of auditory feedback (deafness), whatever the date of apparition in the life-span, affect the accuracy of motor control.

Post-lingually deafened adults, although their hearing experience and maturation of neuromuscular phonation control demonstrate a more or less rapid degradation of pitch and loudness (Cowie & Douglas-Cowie, 1982), deviations in intonation, speech-rate, articulation and tongue positioning (Lane & Webster, 1991), and acquire a better and stable sensibility to somatosensory inputs. In their motor learning task, Nasir & Ostry (2008) obtained a motor adaptation in all deaf subjects but only in 2/3 of their hearing matched controls (Nasir & Ostry, 2008). Speech and voice parameters have been widely investigated in prelingually deaf population. The main characteristics concern abnormal variation in speech-rate (related to the difficulty of the articulatory movement and the weight of motor planification and kinesthetic control) variability and higher values in fundamental frequency (Deqhan & Scherer, 2011; McGarr & Osberger, 1978), inappropriate intonation contours, irregularities of the timbre, and inadequate tongue positioning (Kotby et al., 1996; McGarr & Osberger, 1978) and in 12 months-old children, less tongue movements necessary for the production of some consonants and formant accuracy in vowels. (Mc Gowan, Nitttrouer, & Chenausky, 2008).

The cochlear implant, stimulating electrically the hair cells, restores auditory feedback and led to a decrease of pitch in postlingually deafened adults (Ubrig et al., 2011), in prelingually deaf adults as well as speech-rate and vowel accuracy (Evans & Diliyski, 2007). Concerning the segmental level, the literature in prelingually deaf children reports divergent results when voice parameters of vowels are compared before and after implantation. Seifert & al. (2002) found that children implanted before the age of 4 years displayed Fo values Jitter (short-term variation of frequencies) and Shimmer (short-term variations of intensity) values in a sustained [a] task the range of normal value. These authors focused also on vowel formants. The action exerted on the cavities of the vocal tract involves a configuration of shape, suppleness, size and density. Each configuration implies both a repartition of the acoustical energy and different frequency resonances. Some bands of frequencies are reinforced: the formants. Thus, vowels formants correspond to a configuration allowing the articulation of a vowel. The values of the formants constitute an indicator of the accuracy of articulation. Seifert & al. (2002) found the ratio F1/F2 of their experimental group in the normal range but children later implanted would present more variability in Fo, Jitter, and shimmer. Lower formants of the vowel /a/ were found by Perrin & al. (1999) while Hocevar-Bolcevar (2008) reported a normalization of those of the vowels /i/ and /y/. At the suprasegmental level, speech-rate remained lower than in normal-hearing children (Perrin et al., 1999). In the Lenden & al study (2007) the resonance quality and the use of stress were judged inadequate. Poissant & al (2006) have examined the effect of auditory feedback in a labeling task on word-duration (speech-rate), Fo values, formants frequencies, the percentage of correct phonemes produced and intelligibility in two conditions (CI-on and CI-off). Significant differences were found between the two conditions, performances of the children decreased significantly when the auditory feedback was removed.

To our knowledge, no study has focused on voice parameters in children before and after an auditory training. In a pilot study (non published data) with 6 severe to profoundly bilingual Sign Language/French children (5 hearing aids recipients and 1 cochlear implanted child), we have found after auditory training a decrease of Fo in sustained vowels but equally in their conversational pitch recorded in a picture-naming task (20 items) as well as articulatory modifications of the first and second formants of /a/. Comparing the mean duration per phoneme, we also found an improvement of their speech-rate. We hypothesized that a better auditory accuracy could modify the weight of kinesthetic feedback.

The aim of our study was twofold. We would assess the effect of our training on 1) speech accuracy (Fo-mean and Fo-variability, F1, F2 and F3 values) in a sustained /a/ and 2)

their speaking voice (Fo-mean and Fo-variability) as well as modification of speech-rate (mean duration per phoneme).

2. Method

2. 1. Participants

Out of 25 prelingually profoundly deaf children (4 to 10 year-olds) recruited in the ORL Pediatric Service, Hospital de la Timone in Marseille (France), ensuring the follow-up of the children since the diagnosis of deafness 19 participated to the complete program and/or testing sessions. All of them were cochlear implant recipients. The children came from normal-hearing families and were enrolled in an auditory verbal educational program. They were French native language users. None of them presented a history of laryngeal pathology. They were separated randomly in 2 paired groups. Details of the remained participants' demographic information are provided in table1. All children were fitted with a 22 active electrodes cochlear implant, ACE coding strategy. Parents have been previously informed and have given their written consent.

Table1: Demographic Data of Participants

		Sex	Age	Age at Implantation	Implant duration	Type implant	Schooling
Experimental Group	S1	M	4,8	26	28	nucleus	Mainstream
	S2	F	5,3	35	34	nucleus	Mainstream
	S3	F	5,3	50	14	nucleus	Mainstream
	S4	F	10	35	85	nucleus	Partial integration
	S5	M	9,2	27	65	nucleus	Mainstream
	S6	M	7,7	17	74	nucleus	Mainstream
	S7	M	9	42	65	nucleus	Mainstream
	S8	F	7,8	27	64	nucleus	Partial integration
	S9	F	9,4	37	74	nucleus	Partial integration
	S10	M	8	60	34	nucleus	Mainstream
Mean			7,65	35,6	53,7		
SD			1,79	11,97	23,99		
Control Group	S11	M	6,11	16	67	nucleus	Mainstream
	S12	M	6,4	37	38	nucleus	Mainstream
	S13	F	6,4	41	34	nucleus	Mainstream
	S14	M	4	17	30	nucleus	Mainstream
	S15	F	6,6	51	15	freedom	Mainstream (delayed)
	S16	F	4,1	17	40	freedom	Mainstream
	S17	M	8,11	39	67	freedom	Partial integration
	S18	M	10,1	85	36	freedom	Partial integration
	S19	M	11,6	30	108	nucleus	Mainstream
Mean			7,05	37	48,33		
SD			2,53	21,82	27,92		

2. 2. Material and Procedure

We used the same material and procedure than in our previous pilot study designed to stimulate the four main auditory cognitive processing (identification, discrimination, auditory scene analysis and auditory memory) defined by Mc Adams & Bigand (1994) through interactive games based on four types of sounds (environmental sounds, music, voices, electro-acoustic sounds; Rochette & Bigand, 2009). The program is delivered through a platform that is connected to a computer. It worked with a self-made software called “sounds in hand.” Four categories of sounds were used: environmental sounds, voices, music, and abstract sounds.

Children of the experimental group were invited to interact with the sounding platform according to a progressive increase of difficulty in crossing the complexity of sounds (from environmental sounds to abstract sounds) and the complexity of the tasks (from identification to memory). Each weekly session lasted half of an hour and consisted of the practice of two items x two tasks. The complete program was spread over 16 weeks. Each game began with a familiarization phase. The identification task required the keyboard. The children had to match pictures to the presented sound. In the discrimination task, the children introduced a magnet in a hole. The polarity of the magnet may (or not) change one characteristic (tempo, pitch, timbre) of the sound. The ASA task was performed with the checkerboard that was filled with magnets. An auditory stream composed of two (and later three) auditory sources were presented continuously. Removing a magnet may switch off (or not) a sound. The memory task was a span task. The children have to reproduce a sequence of two to five sounds.

2. 3. Experimental Design

The experiment included two phases: 1- During the first part of the experiment, children of the group 1 followed the training (experimental trained group) while children of the second (untrained) group constituted the control group. 2 – For the second part, group 2 received the training while the group 1 became control group. Three periods of measurements were thus determined for both groups: before the first phase of training, to determinate a baseline of their performances, after the first and the second phase of training (between experimental and control groups and within each group).

Before the testing situations, the children passed a medical examination, a hearing screening and a tuning of their devices. They underwent our complete battery of tests including an evaluation of their auditory skills (accuracy and speed) with similar games but different stimuli of the training program (Rochette & Bigand in preparation) and a phonetic discrimination test. The Praat software Boersma & Weenink, 2011 were used to complete acoustic measures of Fo value (sustained vowel and speaking Fo). We asked the children to reproduce a sustained /a/ in imitation of ours (same level of frequency and amplitude) that was illustrated by a horizontal movement of the arm from the onset to the offset of the vocal production, destined to provide Fo-mean, Fo-variability and the first three formants of this vowel. In a naming-picture task, children were invited to label 20 pictures chosen for the high-frequency of the words and their phonetic structure (i.e. cheval (horse), table (table), chien (dog), pictures are provided in annex 3). We divided the duration of the utterance (from onset to offset of each word) by the number of phonemes produced to obtain a mean duration per phoneme. We assumed that trained children would display lower values in speaking-Fo

and faster speech-rate. We postulated a decrease value in sustained Fo and a reduced variability.

3. Results

We present here the results obtained after the first phase of the experiment.

Sustained vowel

Individual values were compared to normative data (Rochette & Bigand in preparation) to attribute to each participant a score according to the normal distribution. Scores for Fo, Fo-variability, F1, F2 and F3 are displayed in Table 2. Both groups displayed higher Fo and particularly Fo-variability scores than normal hearing children of the same age and same sex. Means decreased in post-test in both group and no significant between pre-test and post-test have been found.

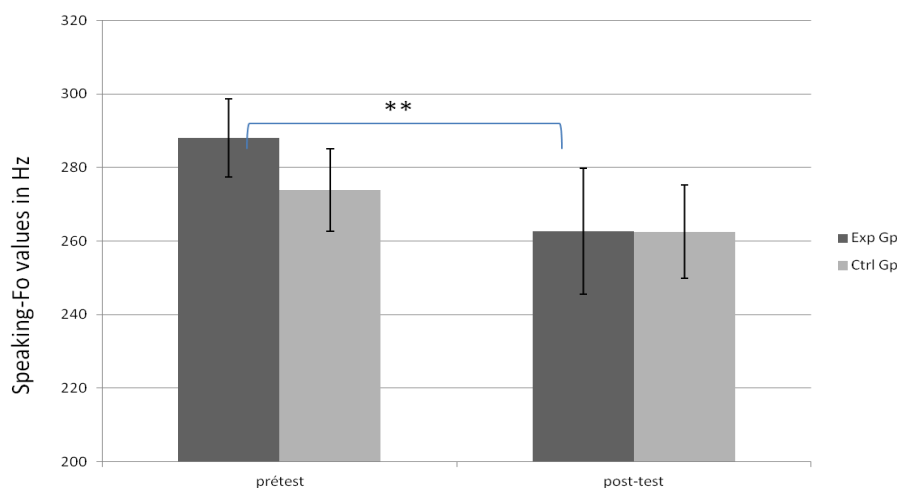
Table 1: Individual scores of Fo, Fo-variability and the three first formants of a sustained /a/ before and after auditory training (Experimental and Control Groups)

Pre-test values										Post-test values											
Fo	FoScore	Fo-variability	score	F1	F1Score	F2	F2Score	F3	F3Score	Fo	FoScore	Fo-variability	score	F1	F1Score	F2	F2Score	F3	F3Score		
S1	307	0,97	77,81	5,66	1197	0,36	1965	0,89	3647	0,5	335	1,79	43,25	2,1	967	-1,31	1667	-0,83	3229	-0,37	
S2	260	-0,1	31,93	1,45	1093	0,2	1876	0,37	3707	0,45	252	-0,5	22,01	0,34	1093	-0,23	1818	0,09	3803	0,74	
S3	260	-0,1	53,11	4,22	821	-2,27	1509	-1,36	2292	-2,13	301	1,95	4,24	-1,94	1101	0,34	1862	0,78	4356	2,79	
S4	291	4	18,17	0,78	785	-2,24	1447	-0,72	2264	-3,93	228	-0,85	17,32	0,64	1036	0,86	1818	1,78	3249	0,25	
S5	241	0,25	22,19	0,7	905	-0,29	1886	1,23	3125	-0,04	239	0,15	2,97	-1,24	730	-2,1	1742	1,77	3021	0,92	
S6	279	1,48	20,21	0,6	960	-0,71	1885	0,2	3574	0,6	321	3,3	51,61	5,08	902	-1,25	1532	-0,76	3288	-0,43	
S7	234	-0,01	30,31	1,52	1151	2,32	2143	5,59	3400	0,8	224	-0,6	38,68	2,37	785	-1,57	1799	2,31	3328	0,47	
S8	419	5,57	85,12	9,86	1227	0,94	1742	-0,26	3661	0,92	323	3,39	13,76	0,32	1055	0,56	1628	-0,92	3288	-0,9	
S9	262	1,54	26,16	1,62	885	1,71	1538	-1,28	3216	-0,48	264	1,69	54,33	6,03	1014	-0,18	1525	-1,42	3362	0,07	
S10	276	1,58	26,41	2,04	807	-1,09	1551	-0,22	3218	-0,02	263	1,04	17,3	0,49	836	-0,87	1560	-0,17	2536	-1,89	
		1,518		2,845		-0,107		0,444		-0,333		1,136		1,419		-0,575		0,263		0,165	
S11	261	0,17	24,66	0,66	1031	-0,29	1543	-0,78	3754	1,18	261	0,17	9,58	-1,11	1074	0,04	1818	0,64	3707	0,94	
S12	284	0,97	10,74	-0,97	1014	-0,43	1799	0,54	3650	1,73	380	4,28	8,74	-1,21	1135	0,55	1843	0,77	3347	-0,38	
S13	263	0,1	79	8,35	921	-1,6	1494	-1,61	2429	-2,62	263	-0,01	20,91	0,4	688	-3,6	1645	0,8	3213	-0,61	
S14	236	-1,12	39,43	1,73	1035	-0,81	1687	-0,71	3059	-0,51	203	-2,09	22,81	0,03	1112	-0,26	1933	0,7	3860	0,96	
S15	469	7,46	34,52	2,27	743	-3	1532	-1,37	2772	-1,74	374	4,07	115,68	13,36	1227	0,83	2067	1,31	3402	-0,13	
S16	254	-0,66	98,43	6,44	1265	0,72	1933	0,37	3879	1,21	222	-1,56	32,82	0,81	1030	-1,07	1574	-1,56	3343	0,08	
S17	256	0,75	49,44	5,94	807	-1,09	1348	-1,37	3154	-0,18	231	-0,29	11,25	-0,53	979	0,21	1628	0,22	2887	-1	
S18	257	1,14	15,02	0,27	1055	1,02	1647	0,69	3440	1,03	222	-0,05	19,43	0,98	1093	1,32	1752	1,36	3556	1,51	
S19	205	-1,25	19,95	1,77	959	0,56	1780	0,46	3307	0,75	188	-2,1	25,5	3,14	907	-0,06	1746	1,56	2815	-1,37	
		0,84		2,94		-0,54667		-0,42		0,09444		0,26889		1,763333		-0,22667		0,64444		3347,778	0

Speaking Fo

We have compared the means between groups before and after auditory training in the two following values: Speaking Fo-mean and Fo-variability (difference between the highest and the lowest values). We performed a 2 (groups) X 2 (periods of test) ANOVA. A main effect of period was found ($F(1, 17) = 11.25$; $P < .004$) but no interaction period x group. This result was not surprising in reason of baseline differences between groups as reported in Figure 1. Children of our experimental group displayed a significant difference between pre- and post-test in speaking Fo-mean values indicating the use of a lower speaking Fo after training. However, the comparison pre- and post-test of Fo-variability remained very similar between and within groups (140Hz vs. 125 Hz for the experimental group and 159 Hz vs. 145 Hz for the controls) and did not reach a significant difference.

Figure 1: Comparisons between and within groups of Speaking Fo-values in Hz



Individual results are displayed in Table 3. Even if children of the control group showed also modifications in the average of these values, only two of them were significant.

Table 3: Individual Fo values and speech-rate x groups x period of testing (*) for $P < .08$; * for $P < .05$; ** for $P < .01$; *** for $P < .001$

	Experimental Group						
	Fo-mean in Hz				Speech-rate in ms		
	T1	T2	P		T1	T2	P
S1	321 (30)	307 (15)	$t(20)=1,8 p<,08$	(*)	239 (319)	154 (90)	$t(20)=1,8 p<,09$
S2	270 (22)	249 (9)	$t(20)=4,46 p<,01$	**	181 (32)	154 (16)	$t(20)=2,04 p<,03$ *
S3	316 (24)	316 (34)	$t(13)=-0,08 p<,92$		222 (70)	163 (26)	$t(13)=3,16 p<,01$ **
S4	290 (17)	236 (11)	$t(19)=13,5 p<,001$	***	188 (39)	148 (30)	$t(19)=3,34 p<,01$ **
S5	277 (26)	233 (19)	$t(19)=5,56 p<,001$	***	122 (28)	96 (18)	$t(19)=3,79 p<,01$ **
S6	302 (30)	260 (34)	$t(20)=4 p<,001$	***	241 (60)	166 (48)	$t(20)=4,37 p<,001$ ***
S7	230 (10)	192 (20)	$t(8)=4,47 p<,01$	**	200 (41)	150 (12)	$t(8)=4,48 p<,001$ ***
S8	343 (28)	292 (13)	$t(20)=8,53 p<,001$	***	292 (96)	168 (35)	$t(20)=14,99 p<,001$ ***
S9	255 (21)	271 (21)	$t(20)=-2,44 p<,05$	*	140 (19)	121 (25)	$t(20)=2,25 p<,05$ *
S10	274 (23)	261 (49)	$t(19)=1,12 p<,27$		159 (34)	143 (37)	$t(19)=1,65 p<,12$

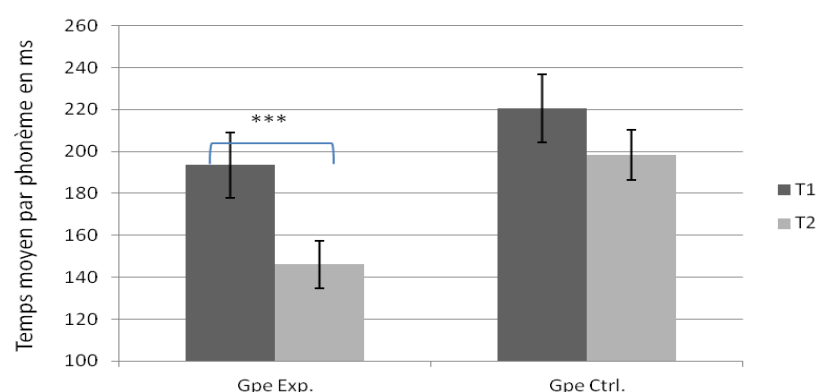
	Control Group						
	Fo-mean in Hz				Speech-rate in ms		
	T1	T2	P		T1	T2	P
S1	272 (50)	255 (32)	$t(20)=1,36 p<,19$		228 (56)	186 (21)	$t(20)=3,45 p<,01$ *
S2	301 (22)	299 (18)	$t(17)=0,24 p<,81$		245 (73)	218 (112)	$t(17)=1,12 p<,32$
S3	278 (40)	290 (16)	$t(20)=-1,44 p<,17$		222 (96)	204 (46)	$t(20)=0,64 p<,53$
S4	219 (14)	219 (24)	$t(18)=0,98 p<,92$		171 (43)	168 (59)	$t(18)=0,21 p<,83$
S5	383 (40)	321 (46)	$t(19)=4,72 p<,001$	***	198 (46)	197 (153)	$t(19)=0,22 p<,98$
S6	249 (30)	258 (69)	$t(19)=-,57 p<,57$		332 (368)	298 (360)	$t(19)=0,29 p<,78$
S7	288 (31)	250 (15)	$t(20)=5,13 p<,001$		187 (118)	166 (91)	$t(20)=0,66 p<,52$
S8	270 (34)	273 (39)	$t(20)=-0,39 p<,7$		157 (44)	153 (95)	$t(20)=0,19 p<,85$
S9	206 (14)	202 (19)	$t(20)=0,77 p<,45$		186 (43)	154 (43)	$t(20)=2,48 p<,03$ *

Speech-rate

Results are displayed in FIGURE 2. We have conducted an ANOVA period (2) x group (2) that revealed a main effect of period ($F(1, 17) = 36,49$; $P < .001$) and a trendy effect of group ($F(1, 17) = 4.41$; $P > .051$). We also found an interaction period x group ($F(1, 17) = 4,83$; $P < .05$). In order to specify the direction of the interaction, post-hoc test was conducted (HSD Tukey) that showed a significant decrease of average duration per phoneme only in our experimental group ($p < .001$).

Individual results revealed a decrease of mean duration per phoneme in all children of our experimental group even if for two of them, this difference appeared not significant.

Figure 2: Comparison groups x periods [pre- (T1) and post-test (T2)] of mean time per phoneme in a naming-picture task. . *** pour $P < .001$. Error bars represent Standard deviation



4. Discussion

The goal of our study was to examine the effects of an auditory training on some objective measures and to assess if an auditory training would modify some voice and speech parameters in deaf children. Studies in postlingually deafened adults and in the paradigm of shifted feedback in normal-hearing population showed that impairment or suppression of auditory feedback involves a greater implication of other mechanisms of voice and speech control (kinesthetic, vibrotactile and somatosensory receptors) and produces subsequent and rapid modifications in pitch, articulation and speech-rate. Conversely, control of voice and speech improved in prelingually adults after cochlear implantation (Evans & Diliyski, 2007). Prelingually deaf children displayed significant differences in fundamental frequency, and better articulation of vowels, speech-rate and intelligibility in the condition with auditory feedback than when auditory feedback was removed (Poissant et al., 2006).

Sustained vowel /a/

In line with Seifert & al (2002), we found a great heterogeneity in Fo value in both group, from -1.25 SD to 7.46 SD in pre-test. Most of the children used a higher Fo than normal hearing children of the same age and same sex. A decrease of these values was found in post-test affecting the two groups so that an effect of training might be excluded. According to the DIVA Model (Guenther et al., 2006) this pattern of results could merely reflect a failing of feed-forward control during sustained phonation and internal representation of phonemes. Feed-forward mechanisms are directing motor planification from previously learned movements. Children could present either a little efficiency of motor planification or poorer internal acoustical phonemic representations. In this case, the Fo-variability could be interpreted as a means to adjust the pitch. Fo-variability can also come from a default of motor control during the production of sustained voice.

Speaking Fo

Comparing the values of Fo-mean obtained with 20 samples/participants, we observed that in average, the children of our experimental group used a lower speaking Fo. However, not all of them displayed a similar pattern: in three children, the decrease was not significant and one child used in post-test a higher speaking Fo. These results suggested that, in average,

children may have modified the type of feedback they used. We have shown that children displayed better auditory performances after training (Rochette & Bigand in preparation). An explanation of a lower speaking Fo would rest with the need of fewer kinesthetic and somatosensory feedbacks. Studies using the paradigm of CI-on (with auditory feedback) vs. CI-off (without auditory feedback) showed that Fo values increased in the absence of auditory feedback (Poissant et al., 2006). We found that the Fo-variability stayed stable across the sessions of testing, suggesting that the prosody was not affected by the decrease of Fo-mean and were able to speak faster than before the training.

Speech-rate

The mean duration per phoneme was lower after training in most of the trained children so that the initial not significantly difference between groups in pre-test became significant after the auditory training. Two ways of understanding these findings should be considered. In a previous study, (Burkholder & Pisoni, 2003) found that speech-rate speed was correlated to memory span. Children who speak the faster were those who displayed longer memory span. Auditory memory was one of the trained tasks of our program. Children of our experimental group improved significantly their memory scores (percentage of items correctly remembered) and span (number of items correctly remembered). In line with these authors, shorter duration per phoneme in our trained group could result from better memory performances. A further explanation could stem from global enhancement of auditory performances. As explained above, children improved globally all their auditory performances. Auditory areas send reciprocal connections with laryngeal and phonation motor cortex. It is possible that faster speech-rate, as well as lower speaking Fo result from neural plasticity.

5. Conclusion

Improvements were found in both groups but significantly in the trained group, except in the sustained vowel. Evolution in the control group suggests the positive effect of duration of use of their device (Geers et al., 2007; Pisoni et al., 2008) whereas auditory training accelerates this processes. Further studies using NIRS would enable to characterize the neural effects of such an auditory training. According to the DIVA Model (Guenther, 2006), we can not actually answer if both feedforward (modifications of internal representations) and feedback (better auditory control) mechanisms are affected by the auditory training. Two main regions of interest could be explored before and after auditory training. The premotor cortex, highly involved in the planification of movements should display increased activity (higher oxygenated hemoglobin and lower desoxy hemoglobin levels after auditory training). Auditory training could also affect auditory processing, and particularly speech accuracy. From this perspective, the differences before and after auditory training could rely on different cortical activations in the auditory cortex region (superior temporal gyrus).

Article 5: Is music a relevant tool in deaf children's auditory training?

Françoise Rochette (1), Sandrine Perraudeau (2), Martial Franzoni (2) & Emmanuel Bigand (1) & (3)

(1) LEAD-CNRS 5022 – Esplanade Erasme – 21000 DIJON

(2) CEOP – 75015 PARIS

(3) Institut Universitaire de France – 21000 DIJON

Abstract: This study assesses the effects of two different strategies of auditory training in deaf children from 7 to 10 year-olds. The first study characterizes the effects of music lessons on the following items of the battery of evaluation that we used in our previous studies: identification, discrimination, Auditory Scene Analysis, Auditory memory (percentage and span) tested with environmental sounds and phonetic discrimination, voice parameters and speech-rate. The second study compare the scores obtained by untrained children, children trained with “Sounds in Hands” and musically trained children. A positive effect of music lessons was found in phonetic discrimination. Trained children displayed significant higher performances, suggesting the relevance of both approaches.

1. Introduction

The relationship between language and music is a fascinating field of research. Even if at first music and language could appear to be very different, both systems are constituted of discrete elements (phonemes and notes) combined in complex acoustic sequences (words and chords) organized into meaningful hierarchical structures. Both systems rely on acoustic parameters that are frequency, timbre, rhythm and intensity and involve shared neural networks. A fundamental question is how musical training may contribute to improve skills in other domains, and whether music would constitute an alternative mean in therapeutic interventions in language-impaired children.

Long-lasting effects of musical training have been studied in professional musicians (compared with non musicians) who demonstrate neuroanatomical and neurofunctional differences (for a review, see Jäncke (2009), Wan, Demaine, Zypse, Norton, & Schlaug, 2010). Such neural alterations are mostly attributed to the amount of training and the age of beginning of musical learning and may rely on 3 factors that are the increased number of active neurons (developing), their degree of temporal synchronization (strengthening) and the increased number of excitatory (and inhibitory) synaptic connections. Recent researches, based on the overlapping of auditory structures involved in both musical and language processing, attempted to understand whether such music-training induced plasticity effects were more widespread than music-directed or could produce effect of transfer on linguistic stimuli processing.

Indeed the left Planum Temporale, a structure responding equally to tones and words during passive listening tasks (Binder et al., 2000) and involved in phonemic discrimination (for a meta-analysis, see Vigneau et al., 2006) is also related to a special perception ability in musicians (absolute-pitch) (Schlaug et al., 1995 (b)). The ability to learn new words which meaning relying on pitch variability is correlated to the volume the gray matter in the left Heschl's Gyrus (Wong et al., 2008) that is more developed in musicians (Schneider et al., 2002). Testing the effects of lexically-manipulated stimuli, Oeschlin and colleagues (2010) found a music-expertise effect exhibited in language processing (lower degree of the bilateral activation of the STG, particularly in the superior temporal gyrus, and a stronger left activation of the posterior MTG (Median Temporal Gyrus). These structures are involved in higher-levels language processing (Oeschlin et al., 2010). At the segmental level of language, it has recently been shown that musicians process voiced and unvoiced stimuli differently than non musicians and display different neurophysiological indicators of early phonetic processing (N1) (Ott, Langer, Oeschlin, Meyer, & Jäncke, 2011). They also displayed better phonemic discrimination than non musicians (Marie, Magne et al., 2011) Using Mandarin monosyllables, Wong and colleagues (Wong, Skoe, Russo, Dees, & Kraus, 2007) found that speech processing (Fundamental Frequency tracking) was higher in musicians than in non musicians at the subcortical level and that musical experience induces efficient top-down connections. Taken together, these findings emphasize the musicians' greater sensitivity to acoustic parameters shared by music and speech.

Positive effects of music lessons in children have been shown in several domain-general abilities as general intelligence (Schellenberg, 2004) and domain-specific abilities as spatial abilities (Costa-Giomi, Gilmour, Sidell et al., 2001), memory (Ho et al. 2003), and language. Musically trained children display better ability to track pitch (Thompson, Schellenberg, & Husain, 2003). Testing the neurophysiological responses to pitch violations in 8-years-old children after 8 weeks of musical training, Magne et al. (2006) found markers in musicians but not in the control group who received painting lessons. After 6 months of music lessons, children displayed enhanced behavioral performances for pitch discrimination, higher electrophysiological responses, and an improvement of their reading scores (Marques et al., 2007). Reading abilities rely highly on phonologic awareness, an ability to manipulate phonetic components of speech. Such results were in line with those of Anvari and colleagues (Anvari et al., 2002) demonstrating correlations between musical abilities and phonetic awareness that are predictive of reading capacities in 4- to 5-year-old children. These findings suggested that musically trained children would develop higher abilities in processing acoustic parameters that are common to music and language and are in line with the hypothesis of transfer of learning.

Only one study assessed that music lessons may improve language perception in deaf children (Yucel, Sennaroglu, & Belgin, 2009). Nine profoundly deaf children were enrolled just after the surgery of cochlear implantation in a musical training at home paired with 9 not trained children (controls). After counseling sessions, each family was provided an electric keyboard and parents were invited to play with their child at least 10 minutes every day. The program comprised 3 progressive steps. The first focused on pitch discrimination (same or different), the second on sequences discrimination and the third on rhythm patterns discrimination. A battery of tests was administrated at 1 – 3 – 6 – 9 – 12 – 24 months to evaluate the progress of both groups. Musically trained children displayed better words recognition (domain-specific) up to 3 months and after two years a questionnaire revealed a more accurate general auditory behavior (domain-general). We point out that no statistical data are provided.

We have proposed a new augmentative approach ("Sounds in Hands") tested in two studies (Rochette & Bigand, 2009; Rochette & Bigand, in preparation). Profoundly deaf

children were trained with an auditory training program designed to stimulate domain-general operations of the auditory perception (McAdams, 1994). The program was delivered through a sound platform linked to a computer, including four auditory tasks with four types of sounds. Their auditory performances in five tasks that were identification, discrimination, Auditory Scene Analysis (ASA), Auditory Memory (trained tasks) and phonetic discrimination (not trained) were tested before and after training, using environmental sounds. Voice parameters depend highly on sensory feedback, particularly auditory feedback (Guenther et al., 2006). Voice parameters can be considered as markers of auditory accuracy. Speaking Fundamental frequency value (Fo) and Fo-range (as an indicator of prosodic elements in voice) were also appraised through the recording of the naming of 20 high-frequency pictures. In comparison to controls, children of our experimental group displayed better performances after training not only in the trained tasks but also in untrained items (phonetic discrimination, voice monitoring and faster speech-rate).

The goal of this study was two-fold. First, we aimed to assess if musical training may affect in profoundly deaf children 1) their domain-general auditory performances as depicted in our battery of tests (identification, discrimination ASA and memory and 2) their sensibility to some basic acoustic parameters common to music and speech that would in return facilitate the building-up of phonological representations (phonetic discrimination) and speech monitoring. Secondly, we would determinate the relevance of these two approaches in comparing the performances of the two groups.

2. Study 1

Children underwent weekly additional music lessons (one hour) from their admission in the Institute to their therapies and schooling. The music lessons were completed in small groups (5 or 6 children maximum) and comprised progressive levels of difficulties. The first steps focused on the binding between motor activities and perception. Children interacted with real instruments, discovering by their motor activities what kind of (and how) different sounds could be produced (including voice). They were also trained to respond to different characteristics of rhythms in adapting their movements to rhythms. Later, memory games (with instruments) were introduced. Emotional judgments were systematically stimulated during listening moments. Musical excerpts could be chosen in accord with their self-reported emotional state. At least, they also played together simple self-written partitions.

The aim of this study was to determine the effects of musical training in profoundly deaf children on the different tasks of our battery. We speculated that music may affect memory and phonetic discrimination scores.

2. 1. Method

2. 1. 1. Participants

Twenty profoundly deaf children recruited through the CEOP (Centre Expérimental Orthophonique et Pédagogique in Paris) participated to the study. Demographic data are provided in Table 1.

Table 1: *Demographic Data of participants*

	Sex	Music	Age in years	Age at Correction in y	Duration of use in y	4 KHz threshold <50 dB	Type of device
S1	M	Yes	10	5	5	no	HA
S2	F	yes	12	2	10	no	HA
S3	F	yes	9	2	7	yes	CI
S4	M	yes	11	<1	11	yes	HA
S5	M	yes	11	4	7	no	HA
S6	F	yes	11	2	9	no	HA
S7	M	yes	11	1	10	yes	CI
S8	F	yes	9	2	7	yes	CI
S9	F	yes	11	2	9	yes	CI
S10	M	yes	11	1	10	no	HA
S11	F	yes	10	2	8	yes	CI
S12	F	yes	11	1	10	yes	CI
S13	F	yes	10	<1	10	no	HA
S14	M	yes	12	3	9	no	HA
S15	F	no	7	3	3	yes	HA
S16	M	no	9	2	7	yes	CI
S17	F	no	7	1	6	yes	HA
S18	M	no	7	<1	7	yes	CI
S19	F	no	10	2	8	no	HA
S20	F	no	9	<1	9	yes	CI

2. 1. 2. Procedure

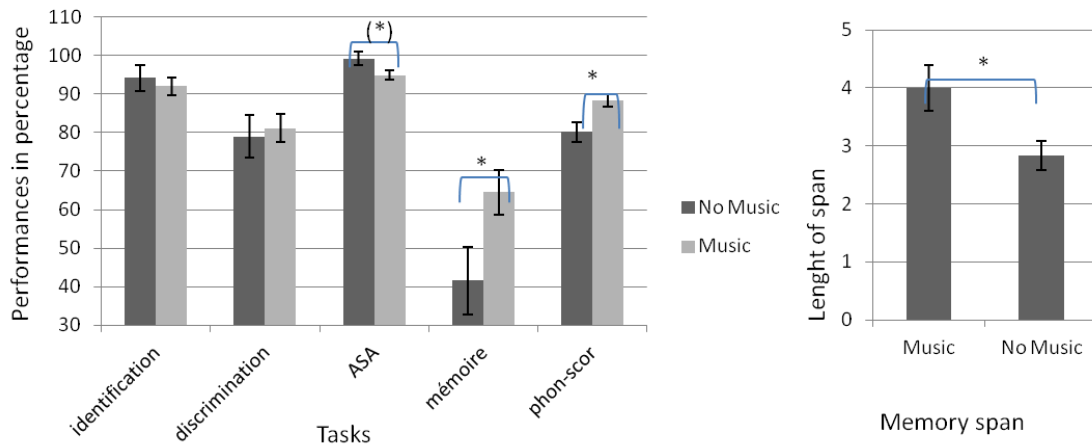
All children were tested individually in a quiet room in their school. We used the same measures protocol than in our previous studies (Rochette & Bigand, 2009; Rochette & Bigand in preparation). The accuracy of auditory perception was assessed in five auditory tasks (identification, discrimination, ASA, memory and phonetic discrimination. The number of correct responses (2 points if the right response was given following the first trial, 1 point if the child required a second presentation of the item) was converted in percentage. This procedure allowed to obtain in the memory task a percentage of correct responses and a span score (correct reproduction of two sequences for each length). We used the Praat software (Boersma & Weenink, 2011) to record and analyze children's voice (speaking Fo and Fo-variability) in a naming-pictures task. The Parents have given their written consent.

2. 2. Results

To determine which auditory task was affected by music lesson, a 6 (tasks, including span) X 2 (music lessons) analysis of variance (ANOVA) was conducted. An Interaction tasks x music was found ($F(5, 90) = 3.68$; $P < .005$). Planned comparisons indicated that music lessons did not account significantly for performances in identification and discrimination scores, but a trend was revealed for ASA ($F(1, 18) = 4.03$; $P > .06$). Music lessons improved significantly the memory scores, percentage of scores ($F(1, 18) = 4.75$; $P < .05$), length of span ($F(1, 18) = 6.11$; $P < .03$) and phonetic discrimination score ($F(1, 18) = 6.88$; $P < .02$). Such

results could be influenced by others factors identified to account for auditory performances in deaf children, as mode of education (oral vs. total communication, or age of diagnosis (Fagan, Pisoni, Horn, & Dillon, 2007; Geers, 2004). Results are displayed in Figure 1.

Figure 1: Comparisons of auditory performances of deaf children who receive or not lessons of music; (*) for $P > .06$; * for $P < .05$. Errors bars represent one standard error.



A multiple regression was performed to determine which factors could account for the scores displayed in our phonetic discrimination test. The chosen factors were date of birth, age of diagnosis and auditory rehabilitation, length of deafness, associated disabilities, type of device (cochlear implant vs. hearing aids) and music lessons. Only the effect of music lesson was found ($R = .591$; $F(2, 17) = 4.57$; $P < .03$). The contribution of music was greater ($t(17) = 2.82$; $P < .02$) than those of date of birth that was not significant ($t(17) = 1.38$; $p > .18$). Other factors were not significant.

2. 3. Discussion

In accord to our assumptions, music lessons would affect cognitive abilities as memory (percentage and span) and better phonetic representations. Similar results have been found in normal hearing children (Ho, Cheung, & Chan, 2003; Moreno et al., 2009) suggesting positive effects of music lessons on the building-up of fundamental cognitive abilities. Furthermore, scores displayed by children trained with the “Sounds in Hand” program were influenced by a procedural degree of familiarity. Music processing involves the activation and the stimulation of numerous areas of the brain (including limbic system). Extended musical training led to neuroanatomical and neurofunctional modifications in cortical structures involved in domain-general and specific-domain regions that in return improves several perceptive and cognitive performances.

3. Study 2

The goal of this experiment was to compare the respective effects of the two training approaches tested with the baseline. In a previous study, we have trained deaf implanted children with our training program (“Sounds in Hands”) and we found significant differences in their performances after training. Music lessons have been shown to account for some

measures (memory and phonetic perception). However, from a clinical point of view, the question of the relevance of both approaches is of importance: the education (and therapies) in deaf children lasts many years (until adolescence or more). A more economic program, in term of time, appears very useful.

3. 1. Method

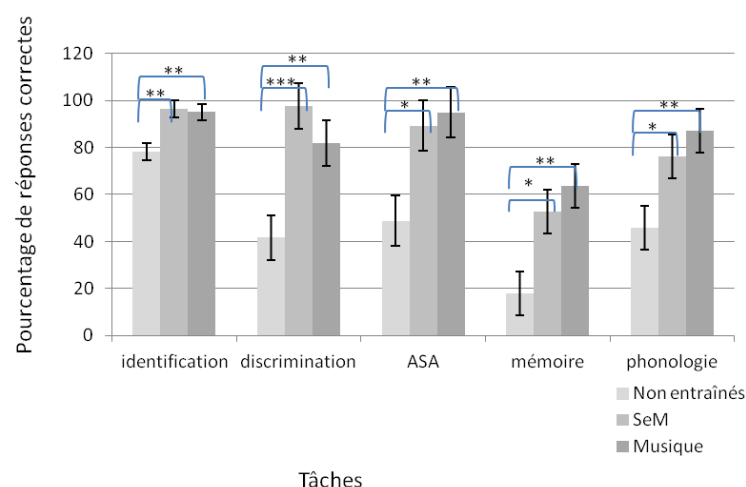
3. 1. 1. Participants

To perform the comparisons between these two described approaches (Sounds in Hands and Music lessons), we paired children of the same age (7 from the first study and 7 from our previous study). The children included in our music group were 10 (SD 0.9) year-olds. Four out of them are fitted with numerical auditory prosthesis. The other three children are cochlear implantees and use a contro-lateral prosthesis. Children of our “Sounds in Hands” group were slightly younger (mean age 8;42, SD=1.13). They were all cochlear implant users (Nucleus 22, coding strategy ACE). They were paired to an untrained control group of 7 children (mean age 8 (2)).

3. 2. Results

We performed a 5 (auditory tasks) X 3 (status of the children) analysis of variance. The statuses were Sounds in Hands children’ performances after training, Musically training children’ performances and untrained children. We found a main effect of the tasks ($F(4, 72) = 22.1; P < .001$), a main effect of children’ status ($F(2, 18) = 9.49; p < .01$) and an interaction tasks x status ($F(8, 72) = 2.09; P < .05$). As depicted in Figure 1, performances of the two groups were relatively similar, except in the discrimination task in which the group “sounds in hands” performed better and a trend in favor of the music group in phonetic discrimination.

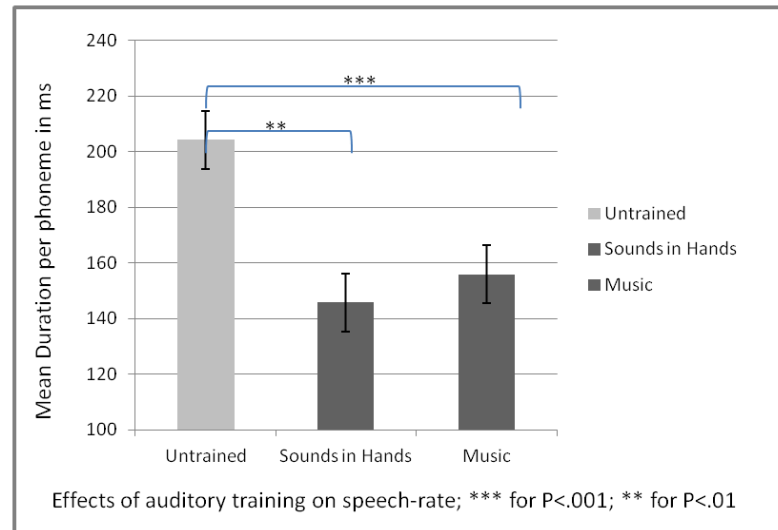
Figure 2: Comparisons between groups (untrained children, Children training with Sounds in Hands and Children who underwent music lessons) of performances in the five auditory tasks. * for $P < .05$; ** for $P < .01$;



Concerning the speech-rate, we conducted a 3 (Status of the children) X 1 (mean duration per phoneme) analysis of variance (ANOVA) A main effect of status has been shown

($F(2, 18) = 9.03$; $P < .01$) on mean duration per phoneme. Trained children displayed similar speech-rate, significantly faster than not trained children (baseline).

Figure 3: Comparisons between groups (untrained children, children training with Sounds in Hands and children who underwent music lessons) of speech-rate. * for $P < .05$; ** for $P < .01$;



Voice parameters

For the purpose, we compared the speaking fundamental frequency (Fo) and Fo variability (differences between lower and higher values of Fo in a naming-pictures task. In the baseline condition, the mean value of the speaking Fo was 286 Hz (SD=52.16). In trained children (with Sounds in Hand), this value decreased to 250 Hz (SD=29.97). This difference reached a sub-significant level ($F(1, 18) = 3.02$; $p > .09$). We found a very comparable speaking Fo value in musically trained children ($M = 252$ Hz, $SD = 29.88$). The Fo-range varied from 161 Hz (SD=33.48) as baseline value to 138 Hz (SD=39.84) for the group “Sounds in Hands” and 140 Hz (SD=43.23) for the Music group. These differences were not significant.

3. 3. Discussion

The goal of this study was to determine if one of the two approaches tested could provide better benefits to the children. First, trained children demonstrate higher perception scores in all the tested tasks, suggesting positive effects of auditory training in general. Studies led to assess this question reported similar results, both in deaf adults (Fu & Galvin, 2006; Fu et al., 2005; Gfeller et al., 2002) and deaf children (Wu et al., 2007). Other auditory disabilities have been reduced with an auditory training in dyslexic children (Hayes et al., 2003; Kujala et al., 2001; Merzenich et al., 1996; Tallal et al., 1996; Temple et al., 2003) and in Severe Language Disabilities (Hesse et al., 2001). Considering our auditory results, it appears difficult to settle in favor of one of the two kinds of training. The size of our samples may account for these results. However, not surprisingly, the higher scores in phonetic discrimination were displayed in musically trained children, even if the differences between the two training approaches were not significant. Such results are congruent with the literature relative to improvement of phonetic abilities in music trained children (Magne, Schön, & Besson, 2006; Marques et al., 2007; Moreno et al., 2009).

4. General discussion

Children of both groups demonstrated positive effects of auditory training according to the five auditory performances that were evaluated. Music and “Sounds in Hands” employ much more frequencies than conversational speech used in conventional speech therapies that their residual hearing can process. The types of sounds used in both training constitute an integral part of our environment. Two findings received our full attention. Musically trained children displayed higher (but not significant) memory performances than children trained with the “Sounds in Hand” program. A slightly difference between the mean age of the two groups might account for these results. Memory span has been shown to increase with age (Baddeley, 1993). Music practice, in addition to improve general and specific auditory processing, is involved in the auditory memory performances (Ho et al., 2003). Recently, an overlap of the structures involved in music and memory processing has been shown (Koelsch, 2009). Using fMRI, these authors asked to the participants to remember either verbal or pitches (working memory for verbal and tonal information) of sung syllables. The activated networks during verbal and tonal information consisted partly of sensorimotor-related circuits (ventrolateral premotor cortex, dorsal premotor cortex, the planum temporale, inferior parietal lobe, the anterior insula, subcortical structures (basal ganglia and thalamus), As motor and sensorimotor systems are highly solicited in music practicing, enhanced memory performances in musicians and among our musically trained children (compared to the group “Sounds in Hands”) might be considered as a consequence.

Secondly, children of the Music group demonstrate globally better phonetic discrimination performances, as suggested in comparing their scores to those of the children “Sounds in Hands”. However, we have shown that phonetic improvements were higher in younger children than in older (Rochette & Bigand, in preparation) suggesting that phonetic representations could be more multimodal in older children and less sensitive to auditory training than in younger children. The major differences are based on the time of the beginning and the amount of training. The musical training began since the children were admitted in the Institution and lasted around 3 years in mean (1 hour weekly), indicating the beginning of training around 6-7 years of age although “Sounds in Hands” program started later in the life of this sub-group of older children (8.7 year-olds). Enhanced auditory performances in musicians are correlated to an early beginning of musical learning (especially Absolute Pitch which is developed in musicians who started their learning before the age of seven years (Pantev, Oostenveld, Engelien, Bernhard et al., 1998; Schneider et al., 2005). The “Sounds in Hands” program constitutes a mid-term training. It is designed for 16 training sessions, lasting around half an hour weekly.

Auditory training affects the accuracy of the auditory feedback in voice production. Our results do not bring us to the agreement of the superiority of one method, as we did not found any difference between the two training approaches in voice values. Speaking Fo and Fo-range are similar between the groups but a clear effect of training was shown in lower values of speaking Fo.

5. Conclusion

Music can be considered as a relevant tool in deaf children auditory training. As an enjoyable stimulus, music constitutes a means to elaborate various activities with children (listening, playing, composing, memory etc...) reusable for a long time. The effects of music

training affect general auditory performances and a better auditory feedback in voice production, particularly memory. This finding suggests that musically trained children could display enhanced capacities of learning.

Article 6 : Reconnaissance des émotions musicales chez les enfants malentendants implantés et appareillés

Françoise Rochette & Emmanuel Bigand

Résumé : L'objectif de cette étude était d'évaluer les capacités d'enfants sourds congénitaux profonds porteurs d'implants cochléaires ou appareillés avec des prothèses auditives à distinguer quatre grandes catégories d'émotions musicales : gaité, tristesse, colère et sérénité comparativement à un groupe d'enfants normo-entendants appariés en âge. Les résultats démontrent d'une part que certaines émotions sont mieux identifiées que d'autres, tant par les enfants sourds que par les enfants entendants. Toutefois, les scores des enfants sourds sont inférieurs à ceux des enfants entendants, probablement pour une certaine part, en lien avec les limites des appareillages.

1. Introduction

L'attraction des personnes malentendantes congénitales pour la musique peut sembler paradoxale mais elle est pourtant avérée par de nombreuses observations (Abdi, Khalessi, Khorsandi, & Gholami, 2001; Mitani, Nakata, Trehub, Kanda, Kumagami, Tabasaki et al., 2007; Nakata et al., 2006; Yucel et al., 2009). Nombre d'entre elles éprouvent du plaisir à danser par exemple, certains sourds profonds s'engagent dans des ateliers de création musicale, et la percussionniste Evelyn Glennie est fameuse pour l'excellence de sa carrière musicale professionnelle, malgré sa déficience sensorielle. Selon plusieurs enquêtes, le langage constitue le handicap le plus invalidant chez les populations sourdes, suivi immédiatement après par la musique. Les adolescents sourds mesurent sans doute combien la musique joue un rôle social considérable dans la formation de la personnalité de leurs congénères normo-entendants et regrettent de ne pas pouvoir participer pleinement à cette activité. Cette importance de la musique pour les sourds souligne le rôle structurant des activités musicales pour la formation de la personnalité. Les implications de cette demande sont importantes pour les évolutions technologiques des prothèses, et l'un des enjeux les plus actuels pour les firmes est de développer des implants cochléaires capables également de restituer la richesse du signal musical.

L'étude des habiletés musicales des sourds reste aujourd'hui peu développée et l'on doit distinguer celles qui portent sur les surdités acquises (chez les adultes) qui rendent compte dans certains cas de compétences perceptives sophistiquées. Ainsi Koelsch et collaborateurs (Koelsch, Wittfoth, Wolf, Müller, & Hahne, 2004) montrent que des adultes appareillés parviennent encore à percevoir des changements subtils dans la syntaxe musicale malgré leur déficience sensorielle. Il est cependant probable que les connaissances musicales préalables, développées durant la période d'audition fonctionnelle, contribuent à compenser l'appauvrissement du signal acoustique dû à la surdité et à l'appareillage. Une autre étude

non publiée mais médiatisée menée par Shibata de l'Université de Rochester, a répliqué le surprenant résultat de Levänen (1998) auprès de 10 des jeunes adultes sourds prélinguaux. Il a confirmé que les vibrations acoustiques captées par le corps, activent le cortex auditif au même titre que l'audition des mêmes stimuli chez des sujets normo-entendants. Ce résultat permet de comprendre l'intérêt des sourds pour la musique, mais il reste probable que ces activations corporelles, même recodées au niveau du cortex auditif, conduisent les sourds à une expérience musicale bien différente de celle des normo-entendants.

D'autres études montrent cependant que les enfants sourds appareillés peuvent malgré tout utiliser différents indices acoustiques encore présents dans le signal sensoriel pour inférer des éléments structurels musicaux. Ainsi, Trehub et collaborateurs (Nakata et al., 2005; Nakata et al., 2006; Trehub, 2008), ont montré que les enfants sourds pouvaient, dans une certaine mesure, reconnaître des airs de chansons populaires souvent entendues. Cette capacité persistante, pour remarquable qu'elle soit, ne suffit cependant pas à conclure que les sourds peuvent avoir une expérience de la musique comparable à celle des normo-entendants. La musique est une structure acoustique et temporelle complexe, qui ne prend une signification psychologique pertinente chez les normo-entendants que dans la mesure où cette structure est associée à des réponses émotionnelles riches et variées. Dans les vingt dernières années, de nombreuses études ont été conduites pour comprendre les mécanismes des processus émotionnels en musique. Plusieurs questions ont été abordées. Il a d'abord été montré que la musique évoque des réponses émotionnelles qui sont stables et consistantes d'un sujet à l'autre, dans la mesure, du moins, où les émotions testées demeurent relativement simples (triste, joyeux, colérique et sérénité par exemple). Cette stabilité intra et inter groupe est d'autant plus grande que les tâches expérimentales utilisées ne font pas recours à une médiatisation linguistique des réponses (Bigand et al., 2005), ou limitent considérablement cette médiatisation. En demandant à des sujets d'évaluer sur une échelle graduée, combien l'une des 4 émotions suivantes est présente dans les pièces musicales (Tristesse, peur-colère, gaieté, sérénité), Peretz et collaborateurs (Peretz, 2010), ont montré que les sujets répondent de façon consistante et qu'il existe une grande fiabilité test-retest (Balkwill & Thomson, 1999). D'autres travaux ont également montré que des jugements émotionnels consistants sont obtenus même lorsque la durée des stimuli musicaux est réduite de façon drastique à quelques centièmes de secondes (Bigand, Delbé, Gérard, & Tillmann, 2011; Bigand, Filipic, & Lalitte, 2005; Filipic, Tillmann, & Bigand, 2010). Ces résultats suggèrent d'une part que les réponses émotionnelles à la musique sont bien moins subjectives que ce qu'il est généralement pensé, et que les auditeurs normo-entendants ont la capacité d'interpréter très rapidement de façon expressive les éléments acoustiques présents dans le signal musical.

Les études conduites chez l'enfant normo-entendant confirment que celui-ci peut, dès l'âge scolaire, comprendre les principales émotions véhiculées par la musique, telles que la tristesse, la gaieté et la colère (Cunningham et al., 1988). L'enfant normo-entendant a bien sûr eu le temps, en étant confronté à la musique dès les premières heures de la vie, d'intérioriser les patterns structuraux expressifs de la musique, ce qui explique cette consistance dans leurs réponses émotionnelles.

La signification psychologique première de la musique résidant dans cette capacité de communication expressive, il importerait de savoir précisément quelle lecture émotionnelle les enfants sourds peuvent avoir de stimuli musicaux équivalents. A notre connaissance l'unique étude ayant abordé cette question auprès d'enfants porteurs d'implants cochléaires (Hopyan et al., 2011) a montré que ces enfants pouvaient différencier des musiques gaies et tristes bien au dessus du hasard (77% de bonne réponse) à des taux de réussite cependant plus faibles qu'un groupe d'enfants normo-entendants (97,3%). Cette performance suggère que les enfants parviennent bien à différencier les stimuli musicaux qui sont associés aux deux émotions musicales les plus contrastées. Le matériel utilisé dans cette étude manipulaient

l'émotion en changeant conjointement le tempo et le mode de versions pianistiques d'œuvres classiques du répertoire (Dalla Bella et al., 2001). Il reste cependant possible que seul l'indice de tempo, aisément accessible aux enfants porteurs d'implants suffise à faire cette discrimination : les stimuli ayant un tempo élevé étant systématiquement associés à des émotions de gaieté. Il reste difficile de savoir, sur la base de cette étude, si les enfants sourds pourraient continuer à différencier d'autres émotions qui sont associées à d'autres variations structurelles dans le signal sonore. Par ailleurs, les stimuli utilisés dans l'expérience sus citée, sont peu représentatifs de la musique instrumentale (orchestre le plus souvent) généralement entendues dans les médias.

L'objectif de l'étude présente était d'évaluer la capacité des enfants malentendants, appareillés et implantés, à distinguer les quatre grandes catégories d'émotions musicales : tristesse, colère, joie et sérénité. Ces quatre catégories peuvent se comprendre dans l'espace émotionnel de Russel (1980), comme contrastant deux grandes dimensions émotionnelles : l'arousal (i.e. l'énergie de l'émotion) et la valence (son caractère positif ou négatif). La gaieté représente ici une émotion de grande énergie positive, la colère de grande énergie négative, la tristesse, de faible énergie négative, et la sérénité de faible énergie de valence positive. Constaté les émotions de gaieté et de tristesse ne permet pas de cerner si l'auditeur est sensible à ces deux dimensions de l'émotion musicale, ou à une seule d'entre elle (l'arousal, notamment). On sait que la valence émotionnelle est facile à percevoir chez les auditeurs adultes lorsque les stimuli sont énergiques (contraste gai / colère), mais qu'elle demeure bien plus ambiguë lors que les stimuli sont de faible énergie (contraste sérénité / tristesse). Il est donc fortement probable que les enfants malentendants éprouvent des difficultés pour le moins similaires à celles des normo-entendants. Une sensibilité, affaiblie, mais résiduelle sur ces deux émotions serait cependant extrêmement encourageante sur ses capacités de perception et ressentir les émotions musicales de façon comparable à l'ensemble de la population.

2. Méthodologie

2. 1. Participants

Les caractéristiques des participants sont indiquées dans le tableau n°1. Les enfants du groupe expérimental ont été recrutés dans un établissement spécialisé dans l'accueil et l'éducation des enfants sourds, le Centre Expérimental Orthophonique et Pédagogique à Paris. Ils participent tous à des leçons de musique (une heure hebdomadaire) depuis au moins 1 an. Les enfants contrôles étaient scolarisés dans deux écoles primaires, l'une en région Bourgogne, l'autre en région Parisienne. Les parents ont donné leur consentement pour la participation de leurs enfants à l'étude.

Les enfants porteurs d'implant cochléaire utilisent également une prothèse controlatérale.

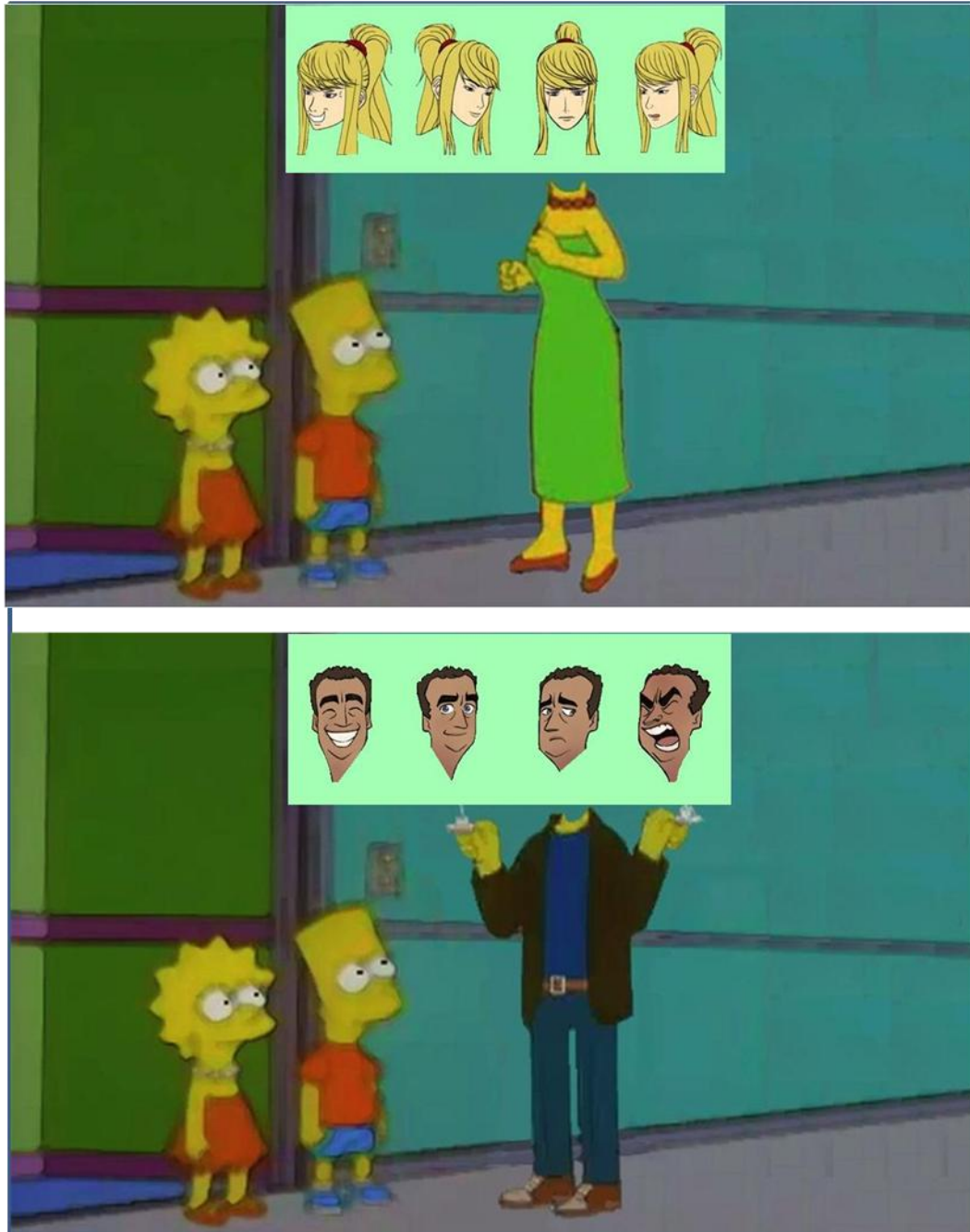
Tableau n° 1 : Caractéristiques des participants. L'appareillage est mentionné PA pour prothèses auditives et IC pour implants cochléaires

Groupe Expérimental						Groupe Contrôle		
	Sexe	Type Appareillage	Age en années	Age Appareillage en mois	Durée Appareillage en mois	Sexe	Age en années	
S1	M	PA	11	44	92	S1	M	10
S2	M	PA	11	68	61	S2	M	7
S3	F	PA	9	94	20	S3	F	10
S4	M	PA	9	17	97	S4	M	10
S5	F	PA	11	21	116	S5	M	8
S6	M	PA	7	6	81	S6	M	7
S7	M	PA	12	10	133	S7	M	11
S8	M	PA	12	33	115	S8	F	11
S9	F	PA	6	21	54	S9	F	7
S10	M	PA	11	5	124	S10	F	10
S11	M	PA	11	4	130	S11	M	11
S12	M	PA	11	16	120	S12	M	11
S13	F	PA	9	8	96	S13	M	10
S14	F	PA	6	11	67	S14	M	10
S15	F	IC	10	16	105	S15	M	7
S16	M	IC	9	14	95	S16	M	10
S17	F	IC	9	19	91	S17	F	8
S18	F	IC	9	19	94	S18	M	10
S19	F	IC	11	28	107	S19	F	8
S20	M	IC	11	11	128	S20	F	11
S21	F	IC	7	20	66	S21	M	8
S22	F	IC	7	43	39	S22	F	10
						S23	F	7
						S24	F	10
						S25	M	7
n=22		Moyennes	9,5	24	92,3181818	n=25		9,16
		Ecart-types	1,896111	21,7452786	30,5511069			1,49240501

2. 2. Matériel

L'étude s'est déroulée avec un écran tactile relié à un ordinateur sur lequel était diffusée l'image des deux enfants Simpson et d'un parent Simpson. Deux possibilités étaient offertes aux enfants : personnage masculin ou féminin dont la tête n'était pas représentée au début de la diffusion des stimuli. Quatre visages (masculins ou féminins selon la condition) correspondants aux quatre émotions testées (dans l'ordre, gaité, sérénité, tristesse et colère) apparaissaient après la cinquième seconde de diffusion du stimulus. Les sons étaient émis par des haut-parleurs de large bande passante. La Figure 1 présente les deux écrans possibles complets.

Figure 1 : Présentation des deux possibilités de choix des écrans



2. 3. Procédure

Les enfants étaient installés devant l'écran tactile. La tâche consistait à apparier la tête du parent Simpson correspondant à l'émotion véhiculée par l'extrait musical en appuyant sur une des quatre icônes de l'écran. Pour cela, les enfants recevaient la consigne suivante : « tu vas entendre une musique qui nous indique comment se sent le père (ou la mère) des enfants. Quand tu as trouvé, tu appuies sur la tête du papa (ou de la maman) ». Une phase de familiarisation contenant huit extraits permettait aux enfants de comprendre le principe de la tâche et de régler le niveau sonore optimal pour chacun des enfants. Nous avons également utilisé cette phase de familiarisation pour s'assurer de la reconnaissance des émotions

faciales. La phase test comportait quarante stimuli musicaux (10) pour chaque catégorie émotionnelle) extraits du répertoire classique d'une durée de 15 secondes, diffusés aléatoirement.

3. Résultats

La première partie de l'analyse porte sur les stratégies de réponses des deux groupes d'enfants. On pouvait notamment penser que les enfants malentendants pouvaient éprouver plus de déplaisir à l'écoute de l'ensemble des musiques et choisir, pour cette raison, plus souvent les catégories de réponses « colère » (voire tristesse) que les autres. Les pourcentages globaux des 4 étiquettes de réponses sont présentés dans le tableau n°2 pour les deux groupes de sujets. Une ANOVA 2 (groupes) x 2 (sexe) x 2(âge) x 4 (étiquettes choisies) ne révèle aucune différence significative entre ces pourcentages pour les deux groupes. Cela suggère que le déficit sensoriel initial n'a pas d'impact quantitatif sur les stratégies de réponses des enfants.

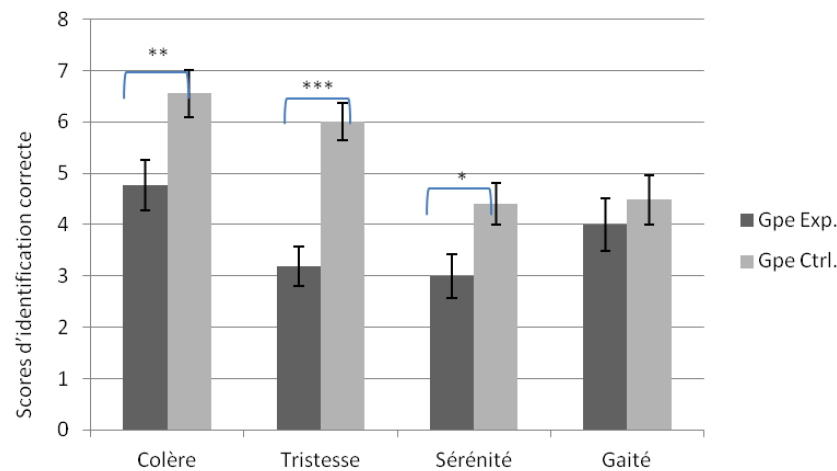
Tableau n°2: Comparaison intergroupes de la distribution des étiquettes émotionnelles choisies

	Groupe Experimental	Groupe Contrôle
Emotion		
Colère	9,68 (1,5)	9,84 (1,41)
Tristesse	10,64 (1,42)	11,16 (1,34)
Sérénité	9,59 (1,68)	10,12 (1,58)
Gaité	10,18 (1,65)	8,88 (1,55)

Identification des émotions

L'analyse de la précision des réponses des enfants a été réalisée en deux étapes. Dans la première nous considérons le nombre de reconnaissances correctes de l'émotion. Par reconnaissance correcte, nous désignons le fait que l'enfant a indiqué le label émotionnel qui correspond à celui que les adultes associent le plus souvent à l'item musical dans les expériences ayant utilisé cette base de données. Les performances moyennes de reconnaissance sont représentées dans la Figure 2. De façon assez convergente avec les résultats obtenus chez les adultes, les émotions de colère et de gaité sont les mieux reconnues. A la différence des adultes, les enfants sont plus performants pour reconnaître la colère que la gaité. L'émotion de sérénité reste l'émotion la plus difficile à identifier. L'analyse de variance 2 (groupes) x 2 (sexe) x 2(âge) x 4 (émotion reconnue) met en évidence un effet du groupe ($F(1, 45) = 17,21$; $P < .001$), de l'émotion reconnue, ($F(3, 135) = 8.57$; $P < .000$) et une interaction ($F(3, 135) = 2.92$; $P < .04$) entre les deux. De façon non surprenante, les enfants normo-entendants présentent des performances globalement supérieures et cet effet est plus marqué pour certaines émotions. Les scores des deux groupes sont présentés dans la Figure 2 (maximum 10). Les enfants sourds démontrent plus de difficultés que les enfants normo-entendants pour identifier finement la colère, la tristesse et la sérénité. La colère apparaît comme l'émotion la plus facile à reconnaître, indépendamment des groupes. Les scores obtenus pour l'identification de la tristesse (3.18) et la sérénité (3) ne sont pas significativement différents du hasard (respectivement $t(21)=1.76$; $P > .09$ et $t(21)=1.32$; $P > .20$).

Figure 2 : Comparaison intergroupes des identifications correctes des émotions musicales; * pour $P < .05$; ** pour $P < .01$; *** pour $P < .001$; Les barres d'erreurs représentent l'erreur-standard.



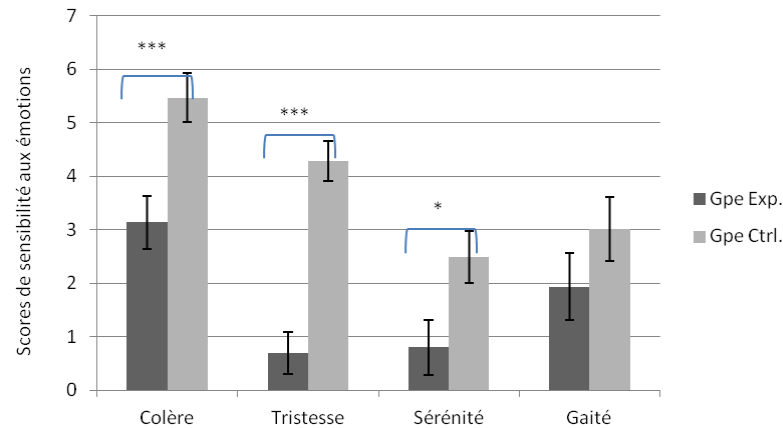
Les comparaisons planifiées intra-groupes ont montré que chez les enfants sourds, le score de reconnaissance de la colère était significativement plus élevé que celui de la tristesse ($F(1, 45) = 6.27$; $P < .02$) et de celui de la sérénité ($F(1,45) = 11.64$; $P < .02$). Chez les enfants normo-entendants, la différence de reconnaissance des émotions colère et tristesse n'était pas significative, ni entre la sérénité et la joie, mais les différences entre colère et sérénité, ainsi qu'entre colère et joie sont significatives (respectivement $F(1,45) = 19,64$; $P < .000$) et $F(1,45) = 12,24$; $P < .001$). Il en est de même entre la tristesse et la sérénité, ainsi qu'entre la tristesse et la joie (respectivement $F(1,45) = 8,75$; $P < .005$ et $F(1,45) = 8,75$; $P < .005$).

L'analyse des performances des enfants a ensuite été reprise en définissant un indice de sensibilité pour chacune des émotions. Cet indice prend en compte la capacité de l'enfant à reconnaître une émotion spécifique lorsque le stimulus musical est associé à cette émotion (hit), et à ne pas confondre cette émotion avec celle induite par d'autres stimuli musicaux (fausse alarme). Comme chaque émotion cible est confrontée à trois autres catégories d'émotion, cet indice s'établit en soustrayant le nombre de Hit par le nombre complet de fausses alarmes, divisé par trois. Par exemple, l'indice de sensibilité pour l'émotion de gaité se calcule par le nombre de bonnes reconnaissances de cette émotion (Hit gaité) minoré par le nombre de fausses alarmes pour cette émotion, divisé par trois, soit le nombre de total de fois où l'enfant a répondu "gai" pour des stimuli musicaux associés à l'une des trois autres émotions. Dans la mesure où les stratégies de réponses des deux groupes d'enfants ne semblaient pas varier, cette seconde analyse donne des résultats convergents avec la première, tout en mettant en évidence quelques difficultés spécifiques aux enfants malentendants.

Les enfants sourds et normo-entendant démontrent des patrons de sensibilité très différents mis en évidence par un effet principal de groupe ($F(1,45) = 17,44$; $P < .001$) et une interaction groupe x émotions $F(3,135) = 16,44$; $P < .001$).

Nous avons également observé un effet principal du type d'émotion ($F(3, 135) = 16,44$; $P < .001$). Les enfants des deux groupes ont manifesté différents scores de sensibilité en fonction du type d'émotions. Ces scores sont présentés dans la figure 3. Notons que le score de sensibilité pour la tristesse et la sérénité (respectivement 0.7 et 0.8) ne sont pas significativement différents du hasard ($t(21)=1.7$; $P > .11$ et $t(21)=1.95$; $P > .06$).

Figure 3: Comparaisons intergroupes des scores de sensibilité par émotion; * pour $<.05$; *** pour $P<.000$. Les barres d'erreurs représentent l'erreur-standard.



D'autres analyses montrent que les réponses de deux groupes ne sont pas affectées par d'autres variables liées aux caractéristiques des enfants, comme le sexe, ou le type d'appareillage, qui corréleraient significativement avec les performances émotionnelles.

4. Discussion

La musique est un stimulus sonore complexe qui varie finement sur de très nombreuses dimensions acoustiques (hauteur, durée, timbre, intensité) et dont les unités de notes et d'accords se combinent en des entités plus larges, (mélodies, processus harmoniques, rythme) et dont la perception requiert de très nombreux processus cognitifs supérieurs. Le traitement de ces différentes organisations ont été largement étudié chez les auditeurs adultes, musicalement entraînés ou non (pour une revue, voir Bigand & Poulin-Charronnat, 2006), et dans une certaine mesure chez les enfants. La capacité des enfants malentendants à traiter ces structures demeure aujourd'hui totalement in-abordée, mais plusieurs résultats préliminaires (Hopyan et al., 2011), suggèrent que certaines persistent malgré leur déficience sensorielle. Les résultats de la présente étude sont amplement consistants avec ces premières conclusions. La tâche requise était également complexe, dans la mesure où ils devaient différencier des émotions qui varient simultanément selon les dimensions d'arousal et de valence (Russell, 1980). Les résultats montrent que les enfants parviennent à faire cette discrimination émotionnelle à des taux supérieurs au hasard et que leurs stratégies de réponse ne semblent pas différer quantitativement de celles d'enfants normo-entendants. La surdité se traduit bien sûr par une diminution très nette de leurs performances, mais il est intéressant de constater que le patron de performance ne diffère pas globalement du groupe d'enfants normo-entendants. De façon non surprenante, ces enfants éprouvent plus de difficulté avec les stimuli sereins, qui se différencient des pièces tristes principalement par des différences structurelles liées à la syntaxe musicale (le mode majeur versus le mode mineur) et qui sont associées à des différences de rugosité sensorielle et de dissonance. Malgré cela, on peut constater que les enfants malentendants ne confondent pas entièrement ces deux catégories de pièces, ce qui suggère qu'ils parviennent encore à extraire des indices acoustiques et structuraux fins qui sont porteurs de ces émotions. Les résultats suggèrent donc que les capacités perceptives musicales des enfants sourds pourraient être moins détériorées par la

surdité que ce qu'il est généralement admis. L'étude met cependant en évidence que le handicap de ces enfants serait beaucoup plus marqué pour reconn tre les pièces associées au sentiment de tristesse. La tristesse est souvent marquée en musique par des intervalles dissonants, telle la tierce mineure (do, mi b). En affectant probablement la sensation de rugosité, la surdité pourrait rendre l'identification de cette catégorie d'émotion beaucoup plus difficile.

L'étude ne permet pas, à ce stade, de comprendre où se situent les différences dans les différentes émotions reconnues comparativement à celles ressenties par les enfants. Cette distinction est importante dans la mesure où les enfants pourraient discriminer les quatre catégories de pièces sur la base de leur caractéristiques acoustiques et structur elles sans pour autant ressentir les émotions associées. Elle ouvre cependant la porte à des expériences supplémentaires permettant de sonder implicitement la réponse émotionnelle. Dans les tâches d'amorçage affectif, par exemple, le stimulus musical est présenté avant un autre stimulus, que le participant doit évaluer sur le plan émotionnel. L'amorçage affectif de la musique se traduit par une influence indirecte de cette réponse en fonction du morceau musical présenté. On peut ainsi montrer, que certaines musiques modulent le jugement émotionnel des visages, qu'elles soient présentées avant le visage (amorçage pro actif), ou après le visage (amorçage retro actif). Les résultats actuels suggèrent que des enfants malentendants pourraient logiquement être réceptifs à ces effets d'amorçage émotionnel musicaux. Un tel résultat permettrait de conclure qu'ils ressentent les émotions induites par la musique de façon similaires aux enfants normo-entendants.

Les performances des enfants malentendants rapportées dans cette étude demeurent cependant difficiles à généraliser à une population plus large d'enfants. En effet, l'étude a été conduite avec des enfants qui ont préalablement été fortement stimulé musicalement, sans pour autant avoir été entraînés spécifiquement à cette tâche de reconnaissance des émotions. Il est possible que cette stimulation leur a permis de développer des processus de traitement de l'information musicale plus sophistiquée que ceux habituellement observés. L'étude actuelle devra donc être répliquée avec un autre groupe d'enfants malentendants privée de stimulation musicale spécifique. Des différences de performance sugg reraient alors que la capacité à reconn tre les émotions en musique, qui pourrait être fortement affectée par la surdité, peuvent néanmoins être relancés par une prise en charge musicale durant la période scolaire.

Article 7 : La surdité affecte-t-elle les capacités d'apprentissage implicite chez les enfants sourds profonds ?

Françoise Rochette & Emmanuel Bigand

Résumé : Le traitement des événements auditifs est par nature séquentiel. Des études récentes ont montré que la déprivation sensorielle précoce affecterait les capacités d'apprentissage séquentiel cependant fondamentales pour l'acquisition du langage. Toutefois, une forte composante mémorielle mise en jeu dans cette étude pourrait intervenir dans les résultats. L'objectif de cette étude est d'évaluer les capacités d'apprentissage implicite chez des enfants sourds profonds dans une tâche qui ne met pas en œuvre une telle composante mémorielle. D'autre part, la musique est une structure sonore et temporelle complexe qui est supposée stimuler fortement les processus d'apprentissage implicite. Le second objectif de l'étude est d'évaluer combien des enfants ayant reçu une stimulation musicale soutenue durant leur prise en charge diffèrent des enfants normo-entendants dans une tâche d'apprentissage implicite. Les performances de 21 enfants sourds profonds congénitaux participant à des leçons de musique hebdomadaires depuis au moins 3 ans sont comparées à celles de 25 enfants normo-entendants, appariés en âge. Les résultats démontrent que les enfants sourds congénitaux musiciens ne diffèrent pas des enfants normo-entendants dans cette tâche. Cette étude devra être poursuivie chez des enfants non entraînés musicalement. Des résultats convergents ouvriraient de nouvelles pistes dans la prise en charge des enfants sourds profonds.

1. Introduction

La surdité est un handicap qui a des répercussions sur de nombreuses autres activités cognitives que la perception, comme la mémoire (Burkholder & Pisoni, 2003; Cleary et al., 2001) et tout particulièrement le langage. L'étude des différentes composantes du langage comme la phonologie, le lexique et la syntaxe montre que toutes les sphères du langage sont affectées par la surdité (Blamey et al., 2001; Dillon et al., 2012; Fagan & Pisoni, 2010; Nicholas, 2000; Nicholas & Geers, 2006). Il a été récemment proposé que la surdité puisse avoir des répercussions importantes sur l'ensemble des fonctions cognitives dans la mesure où elle affecte certains processus centraux dont les apprentissages implicites. L'information auditive étant nécessairement de nature séquentielle, la déprivation auditive aurait pour conséquence de réduire les capacités de traitement séquentiel de l'information (Conway & Pisoni, 2008; Conway et al., 2011; Conway et al., 2009). L'enfant sourd, privé de ces stimulations temporellement structurées, développerait dans une mesure moindre ces capacités à extraire des régularités statistiques présentes dans les séquences d'événements. Or, l'apprentissage des régularités statistiques jouerait un rôle essentiel dans le développement cognitif (Cleeremans, Destrebecqz, & Boyer, 1998 ; Perruchet & Vinter,

1998) et tout particulièrement dans l'acquisition du langage (Pacton, Fayol, & Perruchet, 2005). Le langage se présente en effet comme une suite structurée de signaux qui présente des probabilités transitionnelles tout à fait spécifiques permettant non seulement de segmenter la chaîne linguistique de façon pertinente (Saffran et al., 1996), mais également de comprendre les différentes fonctions syntaxiques des mots. L'absence des stimulations auditives aurait donc potentiellement des conséquences fondamentales sur le développement cognitif, affectant les niveaux supérieurs d'extraction des informations et de compréhension des organisations syntaxiques.

L'apprentissage implicite est un mode d'apprentissage prétendument très robuste, qui précéderait dans la phylogenèse et l'ontogenèse toute autre forme plus explicite d'apprentissage (Reber, 1993). Il serait plus résistant aux atteintes neurologiques, et au vieillissement cognitif et serait nettement moins sensible aux variations individuelles que les formes explicites d'apprentissage. Perruchet et collaborateurs ont par exemple montré que des différences de performance importantes s'observent entre des adultes et des enfants dans des tâches explicites d'apprentissage, mais s'amenuisent voire disparaissent lorsque des formes d'apprentissage implicite sont mises en œuvre. On sait également que des aptitudes cognitives sont préservées chez des patients atteints de lésions cérébrales sévères là où plus rien ne semblait subsister sur le plan explicite. La mise en évidence d'importantes différences de performances dans des tâches d'apprentissage implicite chez les enfants sourds constituerait de ce fait un résultat tout à fait surprenant pour le domaine.

Conway et collaborateurs (Conway et al., 2011) ont comparé les performances d'apprentissage implicite d'enfants malentendants et normo-entendants. Les sujets sont exposés à des séquences (de 2 à 5 éléments) construites à partir de 4 stimuli ne correspondant à aucune structure connue de l'environnement. Ces stimuli apparemment aléatoires se succèdent en fait selon des probabilités transitionnelles fixées par l'expérimentateur. Après une phase d'exposition, (16 séquences de longueur croissante de 2 à 4 éléments), les participants sont soumis à une tâche de reconnaissance. On leur propose alors des nouvelles séquences de stimuli, toutes très semblables aux précédentes, mais dont la moitié seulement est régie par les mêmes probabilités transitionnelles. On suppose que les sujets ont intériorisé ces probabilités transitionnelles durant la phase d'exposition et que cela les conduit à mieux reconnaître ensuite les nouvelles séquences qui suivent les mêmes régularités. Conway et collaborateurs ont comparé les performances des enfants implantés cochléaires et des enfants normo-entendants dans cette tâche. Grâce à leur implant cochléaire, ces enfants bénéficient de stimulations auditives mais ont évidemment traversé une période de leur prime enfance dans la situation de déprivation sensorielle. Toutefois, les informations transmises par la prothèse sont moins riches que celles dont bénéficie un enfant normo-entendant. Comme cette déprivation auditive est supposée affecter des processus centraux de la cognition qui portent sur l'extraction des patterns de régularités, Conway et collaborateurs supposent que les conséquences de cette déprivation auditive n'est pas spécifique à la modalité auditive. La tâche proposée consiste donc à pister l'apparition de 4 couleurs différentes (vert, jaune, bleu, rouge) dans un carré à 4 compartiments. Les probabilités transitionnelles sont telles que certaines successions de couleurs sont plus fréquentes que d'autres. À l'issue de la phase d'exposition (16 séquences), les sujets effectuent une tâche de reconnaissance. Toutes les séquences de couleurs sont nouvelles, et seule la moitié suit les probabilités transitionnelles que celles de la phase d'exposition. Bien que cette expérience n'implique nullement la modalité auditive, les résultats montrent que les enfants implantés cochléaires ont des performances significativement inférieures dans cette tâche, certains répondant à des seuils non différents du hasard. Qui plus est, les performances sont corrélées à l'âge d'implantation, (les enfants implantés tôt ayant des meilleures performances d'apprentissage implicite) et aux

performances linguistiques : les enfants implantés ayant les meilleures performances langagières tendent à avoir de meilleures performances dans la tâche d'apprentissage implicite.

Ce résultat suggère qu'une déprivation auditive a des répercussions importantes pour les processus centraux d'apprentissage implicite. Il est d'autant plus surprenant que l'apprentissage portait sur des stimuli visuels. On pourra toutefois remarquer que la tâche expérimentale utilisée ne comprend pas uniquement une composante d'apprentissage implicite, mais recourt aussi à de fortes capacités de mémorisation à court terme, notamment dans la phase de reconnaissance (séquences de 3 à 5 items). On sait que la surdité produit des répercussions sur la mémoire à court terme (Burkholder & Pisoni, 2003; Cleary et al., 2001) et il était de ce fait difficile de savoir si cette tâche révèle des capacités d'apprentissage vraiment déficitaires ou simplement les difficultés de mémoire à court terme. Pour répondre à cette question, les auteurs ont comparé les scores de reproductions correctes aux séquences de la phase de familiarisation des enfants des deux groupes. Aucune différence n'a été trouvée.

Le premier objectif de notre étude est cependant d'évaluer les capacités d'apprentissage implicite chez les enfants malentendants en utilisant une tâche qui ne met pas en œuvre de composante mémorielle comparable. Dans une tâche de Temps de Réaction Sérielle, le sujet doit pister aussi rapidement que possible des stimuli qui apparaissent, soit sur un écran d'ordinateur (mode visuel). Quatre stimuli différents sont généralement utilisés, et le sujet répond sur 4 touches d'un ordinateur à l'apparition de chacun d'eux. Le sujet n'est pas informé que la séquence de stimuli n'est pas aléatoire mais obéit à des probabilités transitionnelles qui ont été fixées par l'expérimentateur. Plusieurs blocs d'essais sont présentés, et le sujet est supposé intérioriser implicitement ces probabilités. Cet apprentissage implicite contribue à réduire le temps de réaction à la série de stimuli présenté au cours des blocs successifs d'apprentissage. Cet apprentissage est notamment mis en évidence dans un bloc d'apprentissage (généralement le cinquième bloc) au cours duquel les règles des probabilités transitionnelles sont changées à l'insu du sujet. Les temps de réactions augmentent alors sensiblement, sans pour autant que le sujet réalise explicitement que l'expérience a été modifiée. Lorsque les probabilités initiales sont à nouveau respectées dans le bloc suivant, les temps de réponses redeviennent plus courts, comme ils l'étaient avant le bloc aléatoire.

Le second objectif de l'étude est d'évaluer combien des enfants ayant reçu une stimulation musicale soutenue durant leur prise en charge diffèrent des enfants normo-entendants dans une tâche d'apprentissage implicite. La musique est une structure sonore et temporelle complexe qui est supposée stimuler fortement les processus d'apprentissage implicite. Les travaux sur la comparaison des performances musicales d'auditeurs musicalement entraînés et non entraînés suggèrent que cette forme d'apprentissage implicite est très robuste en musique (Tillmann, Bharucha, & Bigand, 2000) et conduit à des performances souvent comparable dans le traitement de la syntaxe musicale (Poulin-Charronnat, Bigand, & Koelsch, 2006). Des formes d'apprentissage implicite de la syntaxe musicale sont également préservées chez des patients cérébro-lésés ayant perdu toute aptitude explicite à traiter la musique. Selon certains auteurs (Mithen, 2009; Trehub, 2003), la musique pourrait être une forme de protolangage qui a préparé l'émergence de la langue notamment en développant les capacités d'extraction de pattern séquentiels. Un apprentissage musical soutenu, pourrait donc contribuer à compenser les pertes d'apprentissage séquentiel supposément induites par la surdité. L'objectif de l'étude 1 était donc de comparer les performances d'un groupe d'enfants sourds préalablement stimulés par la musique à un groupe d'enfants normo-entendants dans une tâche d'apprentissage implicite ne sollicitant pas fortement le recours de la mémoire de travail.

2. Méthodologie

2. 1. Participants

Les enfants déficients auditifs ont été recrutés dans un établissement spécialisé, le Centre Expérimental Orthophonique et Pédagogique à Paris, et les enfants normo-entendants dans des écoles primaires de la région Parisienne et de la région Bourgogne. Les caractéristiques individuelles des participants sont présentées dans le Tableau 1.

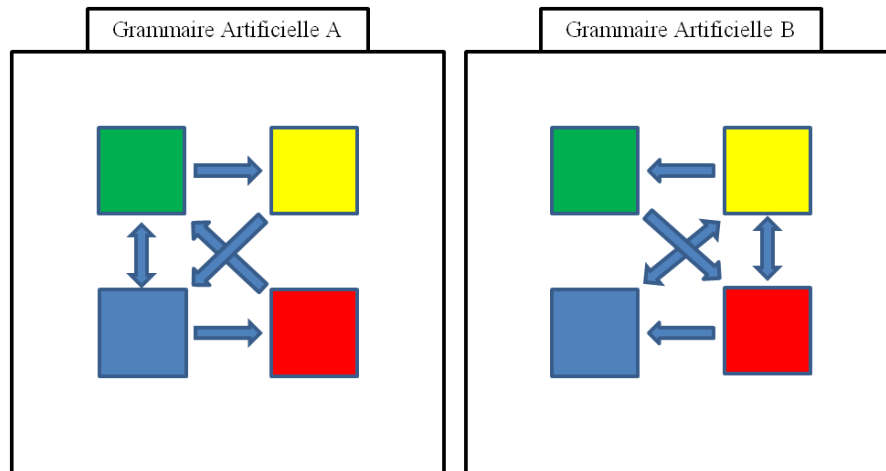
Tableau 1: Caractéristiques individuelles des participants

Groupe Expérimental						Groupe Contrôle		
Sexe	Type	Appareillage	Age	Appareillage	Durée	Sexe	Age	
			en années	en mois	en mois			
S1	M	PA	11	44	92	S1	F	7
S2	M	PA	11	68	61	S2	F	8
S3	F	PA	9	94	20	S3	F	8
S4	M	PA	9	17	97	S4	F	8
S5	F	PA	11	21	116	S5	F	8
S6	M	PA	12	10	133	S7	F	10
S7	M	PA	12	33	115	S8	F	11
S8	F	PA	6	21	54	S9	F	11
S9	M	PA	11	5	124	S10	F	11
S10	M	PA	11	4	130	S11	M	7
S11	M	PA	11	16	120	S12	M	7
S12	F	PA	9	8	96	S13	M	7
S13	F	PA	9	18	89	S14	M	7
S14	F	IC	10	16	105	S15	M	8
S15	M	IC	9	14	95	S16	M	9
S16	F	IC	9	19	91	S17	M	9
S17	F	IC	9	19	94	S18	M	10
S18	F	IC	7	22	62	S19	M	10
S19	M	IC	11	11	128	S20	M	10
S20	F	IC	7	20	66	S21	M	10
S21	F	IC	7	16	68	S22	M	10
						S23	M	10
						S24	M	11
						S25	M	11
n=21		Moyennes	9,571429	23,6190476	93,1428571	n=25		9,08333333
		Ecart-types	1,748469	21,4020471	29,3943629			1,45896245

2. 2. Matériel

Nous avons utilisé un écran tactile sur lequel étaient présentés les stimuli visuels, relié à un ordinateur qui enregistrerait les réponses des participants. La présentation de ces stimuli était effectuée par blocs comportant 40 essais. Leur succession était soutenue par les mêmes probabilités transitionnelles qu'utilisées par Conway et collaborateurs (2011). Les quatre premiers blocs ainsi que le sixième étaient sous-tendus par une grammaire artificielle, notée grammaire A, le cinquième bloc mettant en jeu une autre grammaire notée grammaire B. L'utilisation des grammaires, en tant que matériel d'exposition et de test n'est pas contre-balancée. Les probabilités transitionnelles sont présentées dans la Figure 1.

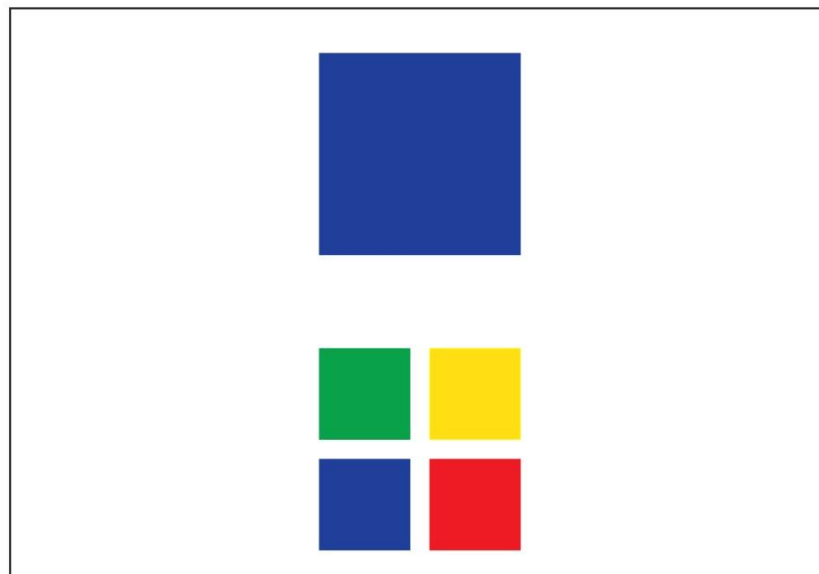
Figure 1 : Représentation des probabilités transitionnelles des deux grammaires artificielles utilisées



2. 3. Procédure

Les enfants étaient installés devant l'écran tactile posé à plat. L'écran est composé de quatre carrés colorés de 8 centimètres de côté. Le stimulus est également un carré de 18 centimètres de côté qui apparaît au-dessus de l'emplacement des réponses. Les participants recevaient l'instruction d'appuyer le plus vite possible sur petit carré situé en bas de l'écran identique au gros carré qui coloré qui venait de s'afficher. La durée d'apparition était fixée à 700 millisecondes et la durée des intervalles réponse-stimuli à 500 millisecondes. La Figure 2 présente l'organisation de l'écran lorsqu'un stimulus est présenté. Pour s'assurer de leur compréhension de la tâche, ils étaient soumis préalablement à une phase de familiarisation constituée de huit stimuli aléatoires.

Figure 2: Organisation de l'écran

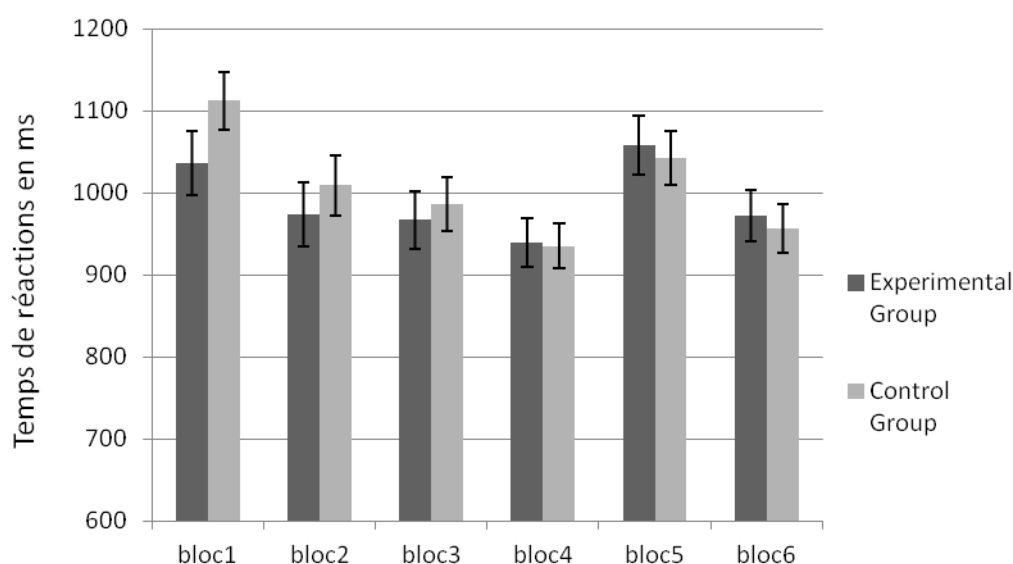


Après chaque bloc, une petite pause est accordée aux participants et l'expérimentation se poursuit lorsque l'enfant donne le signal.

3. Résultats

Les temps de réaction moyens par blocs des deux groupes d'enfants sont présentés dans le Tableau 2. Une ANOVA, croisant les facteurs Groupe (2), Blocs (6) et âge (2), met en évidence un effet principal de l'âge ($F(1, 42) = 10,16$; $P < .01$) , les enfants les plus jeunes (entre 6 et 8 ans et demie) étant moins rapides que les plus grands (9 à 11 ans) et du bloc ($F(5, 210) = 29,24$; $P < .001$), certains blocs menant à des temps de réaction plus longs que d'autres, ainsi qu'une interaction entre Groupes et Blocs ($F(5,210) = 3,3$; $P < .01$). Les comparaisons post-hoc (test HSD de Tukey) indiquent que ce sont les enfants normo-entendants qui présentent des scores significativement différents de ceux obtenus au bloc 1 dans tous les blocs, y compris le bloc 5. Chez les enfants sourds, la différence est significative pour les blocs 3 et 4 mais tendancielle pour les blocs 2 et 6, respectivement $P > .08$ et $P > .07$). Ces résultats suggèrent cependant que les enfants malentendants pourraient avoir plus de difficultés à apprendre la séquence. En effet, la chute des temps de réaction est plus rapide aux blocs 1 et 2 notamment, chez les normo-entendant (plus de pente). Cette pente plus importante pourrait s'expliquer d'une part, par une plus grande dextérité manuelle des normo-entendants, qui, indépendamment de l'apprentissage, répondraient manuellement plus vite à l'apparition du stimulus visuel. Elle pourrait s'expliquer d'autre part, par une capacité d'apprentissage plus lente chez les enfants malentendants, qui, à priori, n'ont pas de raison spéciale d'être manuellement moins rapides. En l'absence de mesure supplémentaire pour comparer les groupes sur ce point, l'étude actuelle ne permet pas de répondre à cette question.

Tableau 2 : Comparaison des temps de réaction par groupe et par bloc. Les barres d'erreurs représentent l'erreur standard.



La part la plus intéressante des résultats est observée sur le bloc 5 qui correspond à un changement de probabilités transitionnelles. On constate ici un allongement substantiel des temps de réaction, suivis, dans le bloc suivant (lorsque les probabilités initiales sont rétablies) d'une réduction de ces temps de réaction. L'analyse statistique montre que cette augmentation

et réduction de temps de réaction sont significatives (entre les blocs 4 et 5, $F(1, 44) = 69,47, P < .001$), et entre les blocs 5 et 6 ($F(1,44) = 39,21 ; P < .001$) et aucun effet de groupe n'est observé.

4. Discussion

L'impact de la déprivation sensorielle sur les processus cognitifs centraux, dont les processus d'apprentissage implicite est une hypothèse récente mais essentielle pour mieux comprendre les déficits cognitifs, linguistique notamment, des enfants sourds. Il est en effet très probable que les stimulations auditives contribuent au développement des capacités d'extraction de pattern séquentiels, quelle que soit la modalité de présentation (Karpicke & Pisoni, 2004; Pisoni et al., 2008) et que ces stimulations contribuent à non seulement à l'acquisition du langage chez l'enfant normo-entendant mais également aux fonctions cognitives supérieures de raisonnement et de déduction pour lesquels les malentendants présentent des difficultés. Cette perspective théorique, ouverte par Conway et ses collaborateurs, (Conway et al., 2011; Conway et al., 2009) a également des répercussions importantes pour la prise en charge des enfants malentendants. Comme le suggèrent les études de Conway, la simple implantation cochléaire ne suffirait pas à remédier à elle seule à ce retard. Les résultats de Conway et collaborateurs suggèrent donc que d'autres formes de stimulations auditives doivent être mises en œuvre pour aider à compenser ce retard. La musique présente toutes les qualités structurelles pour contribuer à combler ce retard. L'objectif de l'étude présente était donc de comparer les performances d'enfants malentendants stimulés musicalement à celles d'enfants normo-entendants dans des tâches d'apprentissage implicite. A la différence de Conway, la procédure expérimentale (tâche de Temps de Réaction Sérielle) ne faisait volontairement pas recours à des composantes de mémorisation à court terme importantes, et ce dans le but de focaliser l'attention sur le processeur d'apprentissage implicite. Les résultats suggèrent que les enfants malentendants, indépendamment de leur appareillage (prothèse ou implant) parviennent tout aussi bien que les autres à apprendre implicitement les probabilités transitionnelles présentes dans le matériel utilisé par Conway et collaborateurs. Ce résultat pourrait suggérer que le résultat initial de Conway était en partie causé par les différences de capacité de mémoire à court terme des deux groupes d'enfants testés. Toutefois, cette interprétation des différences de résultats entre les deux études est peu probable car les auteurs ayant montré que les performances de ces enfants étaient identiques au cours de la phase de familiarisation. Cette divergence des résultats peut également provenir du fait que les enfants de notre étude ont été préalablement stimulés musicalement. Cela suggère qu'une fois stimulés musicalement, les enfants sourds ne présentent pas de différences dans leur capacités d'apprentissage implicite par rapport à des normo-entendants. Ce résultat, s'il était confirmé par des expériences complémentaires, serait crucial sur le plan théorique car il suggérerait que la musique constitue un mode de stimulation qui peut avoir des effets plus importants pour remédier aux handicaps liés à la déprivation sensorielle. Il n'en demeure pas moins, que les résultats de cette étude suggèrent également quelques petites différences dans la rapidité d'apprentissage implicite. Bien que la procédure expérimentale utilisée ici ne permette pas de l'affirmer avec rigueur, les malentendants semblent apprendre moins vite dans les deux premiers blocs que les autres.

Cette étude doit être complétée par deux expériences contrôles. La première consistera à comparer les performances des deux groupes actuels avec ceux d'un groupe d'enfants malentendants, n'ayant pas reçu de stimulation musicale. Nous devrions dans ce cas obtenir selon Conway et collaborateurs, des différences marquées dans la capacité d'apprentissage

implicite. La deuxième expérience contrôle consisterait à refaire l'ensemble de l'étude en réintroduisant la composante de mémoire (tâche de reconnaissance) sur les trois groupes. S'il s'avère que c'est seulement dans cette condition que les groupes diffèrent, alors cela soulignera que la composante qui est affectée par la surdité, malgré l'implant et la stimulation musicale est la mémoire à court terme, et non la capacité d'extraction des probabilités transitionnelles.

Article 8 : Valeurs de la fréquence fondamentale et des formants dans la production d'un [a] prolongé chez les enfants

1. Introduction

La voix est souvent comparée à un modèle source-filtre. La source est constituée de la soufflerie (poumons), l'excitateur ou vibreur (larynx) et le filtre est constitué par le conduit vocal et de ses cavités. Le conduit vocal est lui-même constitué du larynx, du pharynx, de la bouche et des fosses nasales. Les principales cavités mises en jeu dans la résonance sont le pharynx, la cavité buccale et les cavités nasales. Les articulateurs (langues, lèvres, maxillaires, dents, palais, voile du palais et larynx) modifient la configuration du conduit vocal, et par là, ses propriétés acoustiques (Le Huche & Allali, 1991).

La voix correspond à une expiration sonorisée. Contrairement à la respiration au cours de laquelle les poumons se remplissent sous l'effet de l'action des muscles inspireurs et l'expiration par le retour au repos des mêmes muscles, la phonation met en jeu l'activité des muscles expirateurs, c'est le souffle phonatoire.

Le larynx est situé à l'extrémité supérieure de la trachée, au carrefour pharyngien. Sa fonction première est celle d'un sphincter et permet d'obturer les voies respiratoires. Il est constitué de cartilages reliés par des ligaments, des lames aponévrotiques et des muscles recouverts de muqueuse. Les cordes vocales se présentent comme deux lèvres horizontales, placées à l'extrémité supérieure de la trachée. Les insertions postérieures sur les cartilages aryénoïdes mobiles permettent leur écartement et leur rapprochement, produisant ainsi l'ouverture et la fermeture de la glotte de manière cyclique. C'est à ce niveau que les sons sont émis par l'évacuation d'ondes aéroacoustiques. Les muscles intrinsèques du larynx permettent de régler la fréquence fondamentale du son.

Le larynx débouche en haut dans le pharynx. C'est une cavité musculaire qui fait suite à la bouche en arrière de la langue. Il a la propriété de varier de volume, jouant ainsi un rôle dans les sons de la voix. La cavité pharyngale permet également la communication avec les fosses nasales par les mouvements d'abaissement ou de relèvement du voile du palais, permettant un couplage du conduit vocal avec la cavité nasale à l'origine des sons nasalisés. La cavité buccale est la plus importante au niveau des variations de volume et de formes. Elle comprend l'intérieur de la bouche dont la disposition dépend largement de la position de la langue et le vestibule labial (espace entre les dents, les lèvres, les joues). Elle joue un rôle principal dans l'organisation spectrale des émissions vocales en positionnant les formants vocaliques.

L'action portée sur les cavités du conduit vocal produit une configuration de forme, de souplesse, de volume et de densité. Chaque configuration engendre à la fois une répartition de l'énergie acoustique et des résonances variant par leurs fréquences. Il se forme ainsi dans le spectre acoustique des bandes de fréquences renforcées par rapport à d'autres, appelées formants. Les formants vocaliques correspondent donc à une configuration permettant de prononcer une voyelle d'une langue. Bien que la position exacte des formants soit spécifiquement individuelle, les formants se retrouvent de façon interindividuelle dans des zones fréquentielles bien déterminées. Un déplacement de zone entraîne une modification de la perception de cette voyelle. Par exemple, la descente du larynx descend couplée au resserrement des lèvres produisent un allongement du conduit. L'effet est d'abaisser les fréquences des formants. A l'inverse, l'écartement des lèvres produit une augmentation de la valeur formantique. L'aperture buccale affecte le premier formant : plus la bouche est ouverte, plus le formant est haut.

Ainsi, les mesures acoustiques de la production vocalique sont des moyens pertinents pour recueillir des informations les caractéristiques d'utilisation du larynx par la valeur de la fréquence fondamentale et sur la précision articulatoire peut être estimée à partir des valeurs fréquentielles des formants. Cette mesure est généralement effectuée à partir de l'émission de voyelles tenues pendant quelques secondes.

Cependant, à l'augmentation de la taille des résonateurs, est associée la diminution des valeurs fréquentielles. Ce phénomène explique pourquoi les valeurs fréquentielles sont plus élevées chez les enfants et les femmes comparativement à celles des hommes mais aussi pourquoi les valeurs fréquentielles des enfants tendent à diminuer avec l'âge. Une autre explication résiderait dans le fait que la croissance osseuse de la face est plus importante chez les individus masculins et produirait des différences de taille relative de la cavité buccale.

De plus, d'autres mesures comme le jitter ratio (ou local) qui consiste à calculer la moyenne de toutes les différences, en valeur absolue, entre deux périodes consécutives du signal, et à diviser cette moyenne par la longueur moyenne des périodes du signal sont des marqueurs fiables de dysphonie, trouble vocal qui se manifeste par des variations de la périodicité du signal. Une valeur élevée du jitter ratio (local) suggère une atteinte de la motricité laryngée. Le shimmer

Nous n'avons trouvé qu'une seule base de données construite à partir d'échantillons vocaux d'enfants français (Nicollas et al., 2008), cependant les écart-types ne sont pas rapportés, rendant impossible l'utilisation de cette base pour situer l'échantillon vocal d'un enfant par rapport à cette norme. De plus, une autre base de données a été mise au point par Huber et collaborateurs (Huber, Stathopoulos, Curione, Ash, & Johnson, 1999) a été réalisée chez des sujets américains. Les classes d'âges étudiées regroupent des enfants de 4 à 18 ans mais regroupés par tranche de 2 ans. Cependant, cette base a pour avantage de fournir les écart-types des fréquences fondamentales ainsi que les valeurs des trois premiers formants du /a/. Nous notons des différences des valeurs de la fréquence fondamentale entre celle-ci et celle établie par Nicollas et collaborateurs. Cette différence peut être imputée à la différence du matériel d'analyse utilisé mais peut également refléter une variante du phonème /a/ entre les deux langues.

L'objectif de cette étude est d'établir une base normative de différentes valeurs vocales permises par le logiciel Praat (Boersma, 2011) chez une population de filles et de garçons âgés de 4 à 11 ans, en recueillant les valeurs du Fo moyen et sa variabilité, le jitter local, le shimmer local ainsi que les valeurs des trois premiers formants de la voyelle [a]. Conformément aux études antérieures (Huber, 1999 ; Nicollas et al., 2008), nous nous attendons à un effet d'âge se manifestant par une diminution des valeurs de la fréquence fondamentale de la voix ainsi que de sa variabilité, ainsi que des valeurs des trois formants. De même, nous nous attendons à un effet de sexe avec des valeurs inférieures de la Fo chez

les garçons, de même que dans les valeurs des formants. En revanche, les valeurs de jitter et de shimmer devraient être similaires entre les deux sexes.

2. Méthodologie

2. 1. Participants

Neuf cent cinquante enfants âgés de 4 à 11 ans (481 garçons et 469 filles) ont été recrutés dans des écoles de la région parisienne et en Bourgogne après accord des Inspections des Académies correspondantes. Les parents avaient été avertis de la participation des enfants.

2. 2. Procédure

Afin de mieux intégrer l'intervention de l'expérimentateur au sein des classes participantes et de permettre une dimension pédagogique, les séances d'enregistrement étaient précédées d'une courte intervention sur la physiologie de la voix, adaptées à l'âge des enfants participants. Ils ont été sollicités dans la production de sons vocaliques, une main posée au niveau du larynx, permettant la perception des vibrations laryngées, et l'autre sur la partie inférieure du thorax pour vérifier l'expiration active. Des images anatomiques ont été utilisées chez les enfants de primaire (à partir du CP). Ensuite, les enfants ont été invités à produire un /a/ soutenu, enregistré avec un micro Philips à l'aide du logiciel Praat (Boersma & Weenink, 2011). La meilleure portion de chaque échantillon a été analysée avec la fonction Voice Report qui permet d'obtenir de nombreuses valeurs. Nous avons retenu Fo-moyen, Fo-minimum, Fo-maximum pour obtenir la variabilité de Fo, jitter, shimmer. Au point où les formants étaient les mieux groupés, nous avons extrait les valeurs des trois premiers formants.

3. Résultats

Les moyennes et écarts-types pour chacune des valeurs étudiées sont présentées dans le tableau 1. Nous avons réalisé une ANOVA 2 (sexe) x 8 (âge) pour chacune des mesures effectuées.

Fo moyen

Concernant le Fo moyen, nous avons remarqué un effet principal de l'âge ($F(7, 934) = 37.4$; $P < .0001$) et un effet principal du sexe ($F(1, 934) = 9.75$; $P < .002$). Nous avons établi des comparaisons planifiées dont les valeurs et seuils de significativité sont indiqués dans le tableau 2. Nous remarquons non seulement une diminution attendue de la valeur du Fo-moyen liée à l'âge des sujets mais également une différence significative entre les sexes seulement pour certaines classes d'âge.

Tableau 1 : Moyennes et écarts-types des mesures effectuées pour chaque classe d'âge

age	distribution		Fo-mean	Fo-variability	Jitter (local)	shimmer (local)	F1	F2	F3
4 y	males	n= 65	274 (34)	22,48 (9,77)	0,5 (0,3)	5,72 (2,18)	1147 (137)	1814 (174)	3407 (477)
	females	n= 56	278 (36)	23,37 (11,66)	0,64 (0,38)	5,65 (2,16)	1170 (131)	1864 (186)	3303 (475)
5 y	males	n= 75	262 (29)	20,03 (8,18)	0,56 (0,38)	5,82 (2,52)	1057 (128)	1717 (186)	3448 (326)
	females	n= 65	262 (20)	19,07 (8,66)	0,6 (0,41)	5,41 (1,75)	1125 (140)	1798 (212)	3557 (334)
6 y	males	n= 68	256 (29)	19,06 (8,52)	0,55 (0,38)	5,39 (2,07)	1067 (123)	1694 (193)	3450 (272)
	females	n= 62	260 (28)	17,91 (7,32)	0,51 (0,28)	5,04 (1,82)	1122 (126)	1806 (200)	3453 (391)
7 y	males	n= 67	245 (23)	15,98 (7,01)	0,56 (0,32)	5,56 (1,73)	1037 (108)	1652 (158)	3407 (277)
	females	n= 73	252 (30)	16,06 (7,65)	0,53 (0,29)	5,48 (2,32)	1119 (114)	1789 (175)	3477 (211)
8 y	males	n= 54	238 (24)	14,38 (5,9)	0,46 (0,25)	5,12 (1,85)	951 (132)	1589 (175)	3211 (324)
	females	n= 57	248 (25)	14,73 (6,63)	0,58 (0,37)	5,13 (1,97)	1103 (121)	1762 (210)	3350 (358)
9 y	males	n= 49	236 (20)	15,23 (9,89)	0,46 (0,23)	5,21 (2)	933 (94)	1556 (105)	3224 (220)
	females	n= 49	242 (13)	15,83 (6,39)	0,51 (0,29)	4,86 (1,78)	1029 (84)	1743 (160)	3343 (267)
10 y	males	n= 66	233 (21)	13,33 (6,24)	0,47 (0,27)	5,22 (2,3)	928 (125)	1539 (157)	3188 (244)
	females	n= 63	239 (13)	12,56 (6,03)	0,46 (0,21)	4,32 (1,35)	958 (54)	1659 (162)	3295 (221)
11 y	males	n= 38	230 (20)	12,24 (4,36)	0,46 (0,18)	5,11 (1,51)	912 (83)	1545 (129)	3133 (232)
	females	n= 44	233 (25)	13,2 (3,92)	0,53 (0,29)	4,76 (1,43)	989 (123)	1701 (170)	3172 (244)

Tableau 2 : Comparaisons planifiées des valeurs de Fo âges x sexe, seuils de significativité

• Pour $P < .05$; ** pour $P < .01$; *** pour $P < .001$

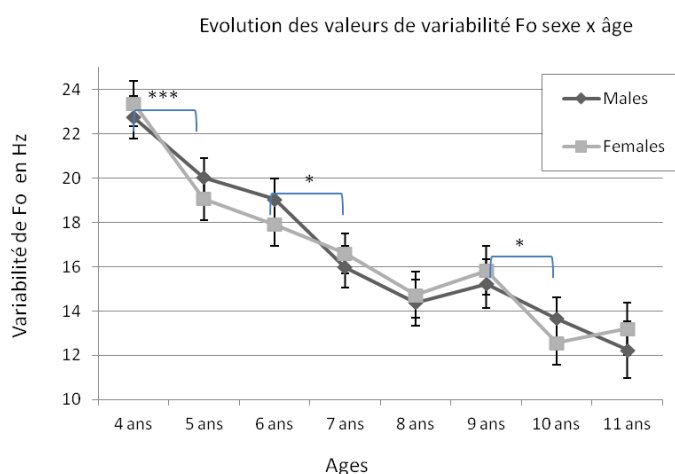
Résultats ANOVA age X sexe pour le Fo moyen en production d'un [a] soutenu, comparaisons planifiées

		Filles																	
		4 ans		5 ans		6 ans		7 ans		8 ans		9 ans		10 ans		11 ans			
Garçons		F	P	F	P	F	P	F	P	F	P	F	P	F	P	F	P	Filles	
	4 ans	0,9	<.34	12,14	<.001 **	14,49	<.001 **	31,89	<.0001***	37,6	<.0001***	51,78	<.0001***	59,53	<.0001***	73,37	<.0001***		
	5 ans	6,95	<.01 *	0,007	<.92	0,14	<.71	4,64	<.04 *	8,15	<.01 *	16,65	<.0001***	19,54	<.0001***	33,21	<.0001***		
	6 ans	15,63	<.0001***	2,03	<.15	0,8	<.36	3,04	<.08	6,06	<.02 *	13,63	<.001 **	15,98	<.0001***	28,84	<.0001***		
	7 ans	40,27	<.0001***	15,31	<.0001***	5,92	<.02 *	2,64	<.1	0,72	<.39	4,79	<.03 *	5,79	<.02 *	15,74	<.0001***		
	8 ans	56,17	<.0001***	27,32	<.0001***	14,5	<.001 **	2,26	<.13	4,43	<.04 *	1,69	<.19	2,07	<.15	9,14	<.01 *		
	9 ans	60,36	<.0001***	31,01	<.0001***	17,5	<.0001***	3,77	<.06	0,2	<.64	1,36	<.24	0,002	<.96	2,88	<.09		
	10 ans	81,63	<.0001***	44,97	<.0001***	26,7	<.0001***	7,46	<.01	1,17	<.27	0,33	<.56	3,62	<.06	3,05	<.08		
	11 ans	66,11	<.0001***	37,33	<.0001***	23,42	<.0001***	7,73	<.01 *	1,9	<.16	0,88	<.34	0,21	<.54	0,15	<.69		
		Garçons																	

Variabilité de la Fondamentale

Concernant la variabilité du Fo (contrôle de la hauteur de la voix), on remarque un effet principal de l'âge ($F(7, 937) = 23,73$; $P < .0001$). Les enfants les plus âgés sont ceux qui présentent la meilleure stabilité de la hauteur de la voix au cours de l'émission vocale, suggérant ainsi un effet de la maturation sur le contrôle de la voix. On ne retrouve pas d'effet de sexe, les filles et les garçons évoluant de façon équivalente. Toutefois, les comparaisons planifiées montrent que l'évolution n'est pas linéaire mais pourraient refléter des paliers d'évolution (voir Figure 1).

Figure 1 : Evolution de la variabilité de Fo sexe x âge. Les barres d'erreurs représentent l'erreur standard. * pour $P > .05$; *** pour $P < .001$



Jitter

Nous remarquons, compte-tenu de la taille de l'échantillon, un faible effet de l'âge ($F(7, 934) = 2.02$; $P < .05$) et un faible effet de sexe ($F(1, 934) = 4.56$; $P < .04$) pour lesquels nous avons effectué des comparaisons planifiées. Les mesures de jitter apparaissent relativement stables entre les sexes et au fil des âges et les différences de moyennes remarquées entre les classes d'âge consécutives ne sont pas significatives. Elles deviennent faiblement significatives chez les filles entre 4 ans et 6 ans ($F(1, 934) = 5.25$; $P < .03$) et entre 6 ans et 8 ans ($F(1, 934) = 4.54$; $P < .04$). La différence des moyennes entre les filles et les garçons est significative chez les enfants de 4 ans ($F(1, 934) = 5.25$; $P < .02$) et de 8 ans ($F(1, 934) = 4.46$; $P < .04$).

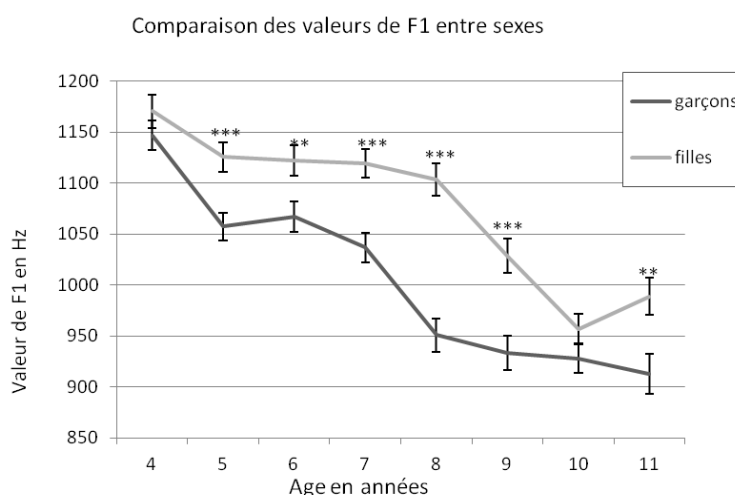
Shimmer

On observe une diminution progressive de la valeur de cette mesure liée à l'augmentation de l'âge des enfants, mise en évidence par un effet principal de l'âge ($F(7, 934) = 3.46$; $P < .002$). Toutefois, chez les garçons, les différences entre les différentes classes d'âges ne sont pas significatives, que les classes d'âges soient consécutives ou non. Chez les filles, la diminution de la valeur du shimmer diminue significativement entre 7 et 10 ans ($F(1, 934) = 11.76$; $P < .001$). Les garçons présentent globalement des moyennes supérieures à celles des filles ($F(1, 934) = 5.69$; $P < .02$) mais la différence n'est significative, entre les 2 sexes, qu'à l'âge de 10 ans ($F(1, 934) = 6.74$; $P < .01$).

Premier formant (F1)

L'évolution de la valeur de F1 est fortement influencée par l'âge (effet principal de l'âge ($F(7, 934) = 48.08$; $P < .0001$) et le sexe ($F(1, 934) = 84.55$; $P < .0001$). Les moyennes et écarts-types, ainsi que les différences sont présentés dans la figure 2.

Figure 2 : Comparaison des valeurs de F1 par âge et sexe. Les barres d'erreurs représentent l'erreur standard. ** pour $P < .01$; *** pour $P < .001$

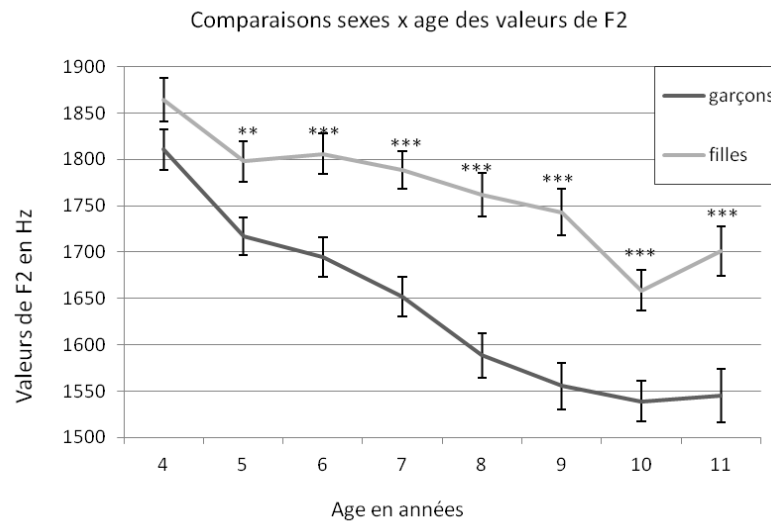


Une interaction âge x sexe ($F(7, 934) = 3.38$; $P < .002$) est explorée par des comparaisons planifiées. Ce n'est qu'aux âges de 4 ans et 10 ans que les différences entre les valeurs présentées par les garçons ne sont pas significativement différentes de celles présentées par les filles. On remarque chez les garçons deux périodes au cours desquelles les valeurs de F1 diminuent fortement : entre 4 et 5 ans ($F(1, 934) = 19.43$; $P < .0001$) et entre 7 et 8 ans ($F(1, 934) = 15.39$; $P < .0001$) tandis que les différences entre les autres périodes consécutives ne sont pas significatives et prennent l'allure d'un plateau. Chez les filles, la diminution significative remarquée entre 4 et 5 ans ($F(1, 934) = 4.21$; $P < .05$) est suivie d'un plateau au cours duquel les diminutions ne sont pas significatives jusqu'à l'âge de 8 ans. En revanche, entre 8 et 9 ans, puis entre 9 et 10 ans, la pente est abrupte ($F(1, 934) = 10.21$; $P < .002$ et $F(1, 934) = 10.05$; $P < .002$).

Deuxième formant (F2)

La valeur en Hz du deuxième formant est également influencée par l'âge et le sexe chez les enfants testés. L'ANOVA révèle un effet principal de l'âge ($F(7, 934) = 23.82$; $P < .0001$). Les enfants les plus jeunes sont également ceux qui présentent les valeurs de F2 les plus élevées, et les valeurs diminuent avec l'âge. On retrouve également un fort effet principal de sexe ($F(1, 934) = 119.77$; $P < .0001$) qui se manifeste par une différence significative des valeurs du deuxième formant dès l'âge de 5 ans. Les valeurs par sexe et les significativités entre sexes sont présentées en figure 3.

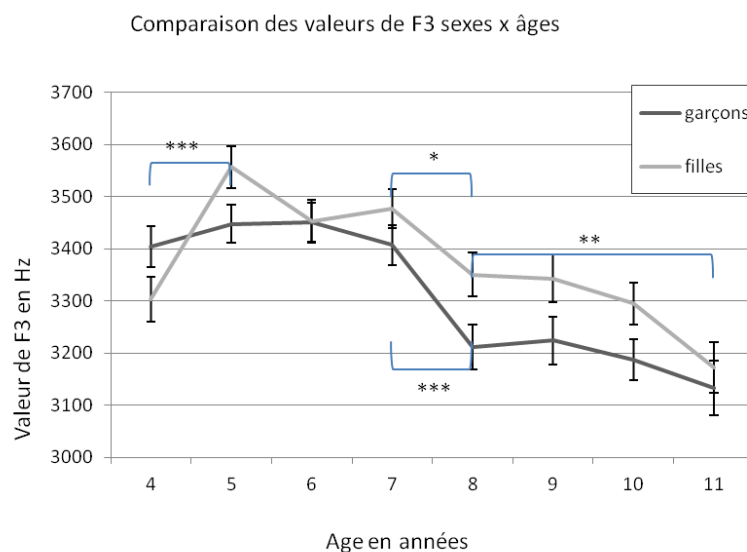
Figure 3 : Comparaison des valeurs de F2 par âge et sexe. Les barres d'erreurs représentent l'erreur standard. ** pour $P < .01$; *** pour $P < .001$.



Troisième formant (F3)

Pour cette mesure, un effet principal de l'âge ($F(7, 934) = 16.1$; $P < .0001$) est remarqué. Les jeunes enfants présentent des valeurs significativement supérieures à celles obtenues chez les enfants plus âgés. Chez les garçons, une période charnière entre 7 et 8 ans, au cours de laquelle la valeur du troisième formant s'abaisse significativement, sépare 2 périodes de relative stabilité (plateau). Chez les filles, cette même période produit un abaissement moins net de la valeur de F3 et sépare une période antérieure de plus forte variabilité et une période postérieure plus stable au cours de laquelle la valeur de F3 baisse de façon régulière. Un effet principal du sexe ($F(1, 934) = 8.3$; $P < .005$) se manifeste par des valeurs inférieures chez les garçons, comparativement à celles présentées par les filles. Ces effets sont représentés dans la figure 4.

Figure 4 : Comparaison des valeurs de F3 par âge et par sexe. Les barres d'erreurs représentent l'erreur standard. * pour $P > .05$; ** pour $P < .01$; *** pour $P < .001$



4. Discussion

L'objectif de cette étude était de construire une base normative des paramètres de la voix chez des enfants de 4 à 11 ans. Contrairement à Huber et collaborateurs (1999) qui avaient établi des classes d'âge de 2 ans, nous avons choisi, comme Nicollas et collaborateurs (2008) la constitution d'un échantillon compatible avec un découpage par tranches de 1 an. Ce choix apparaît validé par les effets d'âge obtenus pour ces différentes mesures, et surtout par les différences significatives entre des tranches d'âge consécutives dans des paramètres vocaux distincts.

Contrairement aux auteurs précités, nous avons également calculé la variabilité de la fréquence fondamentale de la voix au cours de la production du [a] prolongé. Cette mesure n'existe actuellement dans aucune base normative. Elle permet toutefois d'apprécier quantitativement les capacités de contrôle laryngé des enfants, capacités en interrelation avec la qualité du contrôle auditif. Ainsi, une forte variabilité de la fréquence fondamentale de la voix dans une tâche de phonation prolongée devrait conduire à une investigation de l'acuité auditive.

Concernant l'effet de sexe dans la mesure du shimmer local, nous obtenons une tendance inverse à celle de Nicollas et collaborateurs (2008). Ces auteurs ont rapporté des valeurs inférieures chez les garçons comparativement aux filles, bien que les différences ne soient pas significatives. De plus, nous avons noté une différence significative entre les sexes à l'âge de 10 ans. Les différences de tailles des échantillons pourraient expliquer cette variabilité des résultats, de même que le matériel d'analyse utilisé dans les études (Diana Software vs. Praat). Une étude comparative d'échantillons vocaux, avec ces deux logiciels, serait intéressante ici. De même, l'étude comparative des deux bases de données disponibles (Huber, 1999 ; Nicollas, 2008) montre une variabilité concernant les valeurs la fréquence fondamentale. Huber et collaborateurs, utilisant le logiciel d'analyse CSpeech ont précisé une valeur de 246 Hz chez les garçons de 6-7 ans (valeurs assez proches des nôtres), tandis que Nicollas a obtenu des valeurs supérieures (268,9 Hz en moyenne chez les garçons de 6 ans et 252,7 Hz chez les garçons de 7 ans).

Nous remarquons enfin des différences importantes dans les valeurs relevées par Huber et collaborateurs dans les valeurs des formants, qui ont retrouvé des valeurs pour F1 et F2 inférieures aux nôtres mais des valeurs de F3 supérieures. Outre la différence de matériel utilisé, nous pouvons interroger sur la constance et/ou la variabilité phonétique à travers les langues. Il est possible que les phonèmes apparemment communs à des langues différentes se distinguent par des fines différences acoustiques.

Article 9 : La musique comme outil de stimulation cognitive

Aline Moussard ⁽¹⁾⁽²⁾, Françoise Rochette ⁽¹⁾ & Emmanuel Bigand ⁽¹⁾⁽³⁾

⁽¹⁾ Laboratoire LEAD – CNRS UMR 5022 ; Université de Bourgogne, Dijon, France

⁽²⁾ Laboratoire BRAMS ; Université de Montréal, Montréal, Canada

⁽³⁾ Institut Universitaire de France

Article sous presse dans l'Année Psychologique

Note : Les deux premiers auteurs ont également contribué à la rédaction du présent article.

Résumé : Les effets de la pratique et de l'écoute musicale sur le fonctionnement cognitif et cérébral ont été grandement étudiés depuis les 20 dernières années. Les études comportementales et de neuroimagerie ont mis en évidence une importante réactivité du cerveau aux stimulations musicales et de nombreux chevauchements anatomiques et fonctionnels entre les traitements musicaux et des compétences non musicales (linguistiques, motrices et émotionnelles notamment). Parallèlement à ces travaux, d'autres études ont cherché à montrer et à expliquer des effets bénéfiques de transfert de la pratique ou de l'écoute musicale sur la cognition et la motricité, chez des sujets sains comme dans des populations pathologiques. Cette revue de littérature vise à intégrer l'ensemble de ces données pour mieux comprendre pourquoi la musique constitue un outil de stimulation cognitive avantageux et comment elle peut être utilisée dans des perspectives thérapeutiques novatrices, tout particulièrement dans le champ de la neuropsychologie cognitive.

Abstract: The effects of practicing and listening to music on cognitive and neural function have been highly studied during the past twenty years. Both behavioral and neuroimaging data have revealed the extent and plastic nature of the brain's response to musical stimulation. Furthermore, some degree of overlap has been found, both in neuro-anatomy and function, between musical processes and those of non-musical abilities (especially linguistic, motor and emotional). Concurrently, numerous studies have sought to demonstrate and explain the beneficial effects of practicing or listening to music on both the cognitive and motor abilities of healthy subjects and patients. This literature review aims to integrate these data in order to understand how music can be a relevant tool for cognitive stimulation and how it could be used as part of innovative therapeutic approaches, especially in the field of cognitive neuropsychology.

English title: Music for cognitive stimulation

1. Introduction

Durant les 20 dernières années, les sciences cognitives de la musique se sont focalisées sur les effets de la musique sur le fonctionnement cérébral des sujets sains ou pathologiques. Cet article présente l'état actuel de ces études, selon 3 grands axes. La première section expose d'une part en quoi l'humain semble bénéficier d'un pré-équipement biologique pour le traitement de la musique, et d'autre part comment la musique parvient à stimuler le cerveau d'un point de vue physiologique au même titre que des stimuli biologiquement pertinents, et à modifier anatomiquement et fonctionnellement le cerveau des musiciens aguerris, ou même novices.

La seconde section rend compte des effets bénéfiques de l'écoute ou de la pratique musicale sur des performances cognitives non musicales. Des liens importants ont été montrés entre les opérations dirigées vers la musique et les autres compétences mentales. Jouer ou écouter de la musique peut en effet requérir différents aspects de la cognition (attention, mémoire, mémoire de travail), de la perception (auditive, voire spatiale), de la motricité, ainsi que du réseau émotionnel. En stimulant ces différentes activités cérébrales, la musique a la possibilité d'améliorer leur fonctionnement, y compris dans des tâches non musicales.

La dernière section de cet article considère les travaux dans les domaines cliniques qui ont utilisé la musique comme moyen de remédiation d'atteintes cognitives, perceptives ou motrices, consécutives à des lésions cérébrales. L'ensemble de ces études suggère que la musique constitue un outil de stimulation probant, dont les effets peuvent être expliqués à différents niveaux. En plus de proposer des situations ludiques, qui favorisent l'éveil et la motivation, certaines composantes musicales peuvent être exploitées pour stimuler plus spécifiquement des fonctions cérébrales ciblées (par exemple, le rythme pour la production du mouvement). Ces recherches ouvrent des perspectives intéressantes pour les stratégies de stimulation et remédiation cognitives, les thérapies musicales se trouvant être compatibles avec les problématiques du milieu clinique (coût financier, contraintes de temps, accessibilité aux patients).

2. L'importante réactivité du cerveau humain à la musique

La place de la musique dans l'évolution de l'espèce humaine a fait l'objet de nombreux débats, qui se trouvent aujourd'hui relancés par les découvertes récentes en neurosciences cognitives. Selon Pinker (1997), la musique serait une activité humaine plaisante qui emprunterait les fonctions cérébrales qui ont été sélectionnées par l'évolution (le langage tout particulièrement). Elle serait une sorte de « cerise sur le gâteau » sans fonction adaptative et qui pourrait disparaître sans modifier le cours de l'humanité. Pour d'autres auteurs, la musique aurait une importance biologique et psychologique telle qu'elle pourrait avoir joué un rôle adaptatif dans l'évolution de l'espèce. Certains suggèrent qu'elle aurait précédé l'émergence de fonctions cognitives sophistiquées telles que le langage articulé (Mithen, 2009; Peretz, 2006). L'existence de flûtes fabriquées dans de l'os, exhumées lors de fouilles archéologiques et datées de 40 000 ans, démontre que la musique n'est pas une activité de loisir récente et il est fort probable que des formes non instrumentées de musique soient apparues il y a 250 000 ans (voir Huron, 2001 ; Mithen, 2005). La musique est aussi présente dans toutes les cultures, et certains comportements musicaux universaux, comme l'utilisation du chant par les mères pour communiquer avec les bébés (Trehub & Schellenberg, 1995), sont en faveur d'une hypothèse biologique évolutionniste de la musique

pour l'humain. Au 19^{ème} siècle, Darwin (, 1871) suggérait déjà son importance probable pour la sélection du partenaire. Plus récemment, les études en neurosciences cognitives ont souligné son rôle crucial pour la communication émotionnelle mère-enfant (Trehub, 2003), la cohésion sociale (Peretz, 2006), et le développement cognitif (Gruhn, Galley, & Kluth, 2003). Cette approche serait soutenue par la mise en évidence d'un gène (AVPR1A) dont la présence serait corrélée aux aptitudes musicales, et qui interviendrait par ailleurs dans la régulation d'une hormone (l'arginine vasopressine) influençant les capacités d'apprentissage générales ainsi que les comportements pro-sociaux (l'amitié, l'attachement et l'altruisme ; Ukkola-Vuoti et al., 2009). Ces découvertes et théories ont donc conduit de nombreuses disciplines à reconsidérer l'importance de la musique dans le développement de l'espèce humaine, soulevant par exemple la question de la part de l'inné et de l'acquis des habiletés musicales (pour des développements récents autour de ces questions, voir Mithen, 2009; Patel, 2010; Peretz, 2006; Trainor, 2008).

Une explication hybride consiste à concevoir la musique comme une « technologie transformationnelle de l'esprit » à l'échelle de l'espèce (Patel, 2010). La musique, comme par exemple la maîtrise du feu, ne résulterait pas d'une évolution adaptative au sens strict. Elle serait une invention humaine qui aurait eu des conséquences cruciales pour le développement cognitif, émotionnel et moteur de l'espèce. Cette invention aurait contribué à « transformer » le cerveau humain durant l'évolution, ce qui expliquerait la place qu'occupe aujourd'hui la musique dans les activités humaines. Cette première partie expose les principaux arguments en faveur de l'importance de la musique pour l'humain : la précocité de son traitement et son impact sur la neurophysiologie et la plasticité cérébrale chez l'enfant et chez l'adulte.

2. 1. Précocité du Traitement de la Musique dans le Développement

La psychologie cognitive et du développement a mis en évidence des compétences perceptives très précoces pour la perception et la cognition musicales, évoquant des prédispositions – un pré-équipement biologique – pour le traitement de ce stimulus (Trainor & Heinmiller, 1998; Trehub, 2003). La cochlée est fonctionnelle à la fin du 5^{ème} mois de la vie fœtale et les sons qui parviennent au fœtus sont traités et mémorisés. Des airs entendus à cette étape du développement seraient reconnus par les bébés à l'âge d'un an, même s'ils n'ont pas été ré-écoutés entre-temps (Lamont, 2003). Les nouveau-nés démontrent des patterns d'activation cérébrale similaires à ceux des adultes non musiciens dans des tâches de perception musicale (Perani et al., 2010). Ils montrent aussi une préférence pour la voix maternelle chantée plutôt que parlée (Nakata & Trehub, 2004).

Dès 6 mois de vie, les enfants présenteraient des profils comportementaux similaires à ceux des adultes dans de nombreuses tâches musicales. Ils sont par exemple capables de distinguer des modifications de hauteur (Plantinga & Trainor, 2005) et de tempo (Trehub, Schneider, & Henderson, 1995) dans une mélodie. Il semble également que, dès un très jeune âge, les enfants préfèrent les intervalles consonants plutôt que dissonants (Trainor & Heinmiller, 1998), perçoivent les structures des phrases musicales (Jusczyk & Krumhansl, 1993) et apprennent rapidement les règles de nouveaux langages musicaux (Saffran, Loman, & Robertson, 2000 ; voir aussi Hannon & Trainor, 2007, pour une revue de littérature concernant les apprentissages musicaux par enculturation chez l'enfant). Les habiletés pour discriminer et catégoriser des séquences rythmiques sont également précoces (pour une synthèse de ces travaux chez les enfants, voir Patel, 2008, pp. 405-408).

Enfin, les enfants sourds, après réhabilitation de leur fonction auditive par implantation cochléaire, développent rapidement des aptitudes perceptives musicales et démontrent finalement des patterns comportementaux identiques à ceux des enfants

entendants ; ils peuvent également reconnaître et mémoriser des mélodies (Mitani, Nakata, Trehub, Kanda, Kumagami, & Tabasaki, 2007; Nakata et al., 2005; Vongpaisal et al., 2006). Ces observations soulignent l'automatisme de la mise en place des processus de traitement de la musique dès que l'audition est fonctionnelle.

La réponse émotionnelle à la musique apparaît également de façon très précoce. Dès l'âge de 9 mois, les enfants discriminent la valence émotionnelle des musiques qui leur sont présentées (Flom, Gentile, & Pick, 2008). À 6 ans, leurs compétences pour identifier les émotions de base dans la musique sont identiques à celles des adultes (Cunningham & Sterling, 1988; Terwogt & Van Grinsven; Terwogt & Van Grisven, 1991). Il se montrent capables d'utiliser des indices acoustiques comme le tempo (à partir de 5 ans) et le mode (majeur ou mineur, à partir de 6 ans) pour classer les extraits présentés en fonction de leur contenu émotionnel (Dalla Bella, Peretz, Rousseau, & Gosselin, 2001).

2. 2. Impact de la Musique sur la Physiologie de l'Enfant et de l'Adulte

La musique est un vecteur d'émotion privilégié : la perception des émotions musicales semble relativement robuste d'un individu à l'autre, et très rapide (500 ms suffisent pour identifier la valence d'un extrait, voir par exemple Peretz, Gagnon, & Bouchard, 1998; Vieillard et al., 2008). Depuis les années 1980, certaines stratégies visent à l'utiliser pour induire des émotions chez des sujets, mais les mécanismes sous-jacents sont encore peu identifiés (voir Juslin & Västfjäll, 2008, pour revue). Dans les dernières années, les études en neurosciences ont montré que ces mécanismes émotionnels sont fortement reliés à des réactions physiologiques.

Witvliet & Vrana (2007) ont testé les liens entre l'émotion ressentie et les modifications physiologiques en utilisant des échelles d'appréciation, des enregistrements électromyographiques des muscles de la face et des mesures du pouls. L'émotion musicale est évaluée en fonction de deux composantes : sa valence (positive ou négative) et sa dynamique (ou *arousal* ; stimulante ou calme). Les jugements d'appréciation montrent que la musique à valence positive semble préférée à la musique à valence négative. Cette préférence s'accompagne d'une activité plus importante des muscles zygomatiques (impliqués dans le sourire), surtout si la musique est de dynamique stimulante. L'écoute d'une musique à valence négative et à dynamique plus calme est la condition qui produit l'activation du muscle sourcilier (plissement frontal) la plus importante. Les modifications du rythme cardiaque seraient davantage liées à la dynamique qu'à la valence des pièces écoutées. La musique joyeuse et calme est la condition qui permettrait le plus fort ralentissement du rythme cardiaque (Witvliet & Vrana, 2007 ; voir aussi Bernardi, Porta, & Sleight, 2006, et Gomez & Danuser, 2007, pour des modifications des constantes cardiovasculaires et respiratoires liées à l'écoute musicale).

L'écoute musicale module aussi les composantes neurophysiologiques associées à l'état de stress. Chez le jeune enfant, l'écoute du chant maternel régulerait le taux de cortisol sécrété par les glandes salivaires, l'augmentant ou le ramenant à une valeur moyenne (Shenfield et al., 2003). Les mêmes effets sont retrouvés chez l'adulte. Après un stress, ce taux cesse d'augmenter lorsque les participants écoutent une musique relaxante, alors qu'il continue à augmenter pendant 30 minutes dans la condition contrôle silencieuse (Khalfa, Dalla Bella, Roy, Peretz, & Blondin, 2003). Cependant, une seconde condition contrôle serait nécessaire ici pour tester la spécificité musicale de cet effet, et vérifier qu'il n'est pas dû à une simple distraction qu'offrirait la musique comparativement à une condition neutre de silence.

D'autres effets physiologiques notoires ont été mis en évidence, notamment au niveau de la libération de dopamine (Menon & Levitin, 2005). Une étude sur le frisson musical (Blood & Zatorre, 2001) a montré que la musique recrute des systèmes neuronaux de la récompense et des émotions similaires à ceux qui sont connus pour répondre spécifiquement à des stimuli biologiquement pertinent (comme la nourriture et le sexe), et ceux qui sont activés par la consommation de drogues. Dans une étude plus récente, Salimpoor et collaborateurs (Salimpoor, Benovoy, Larcher, Dagher, & Zatorre, 2011) ont distingué deux formes de plaisir musical qui seraient supportées par des structures cérébrales distinctes : le pic émotionnel à l'arrivée d'un événement musical déterminant, souvent associé à la sensation de « frisson » et marqué par la libération de dopamine (striatum ventral et dorsal, notamment noyau accumbens droit) ; mais aussi, une forme de plaisir d'anticipation qui précède ce pic (caractérisée une augmentation progressive de l'activité du noyau caudé). Ce plaisir d'anticipation reflète la structure de la musique, dont l'expression émotionnelle repose essentiellement sur les attentes perceptives, créées par l'alternance des tensions et détente musicales (Bigand, 2009).

La musique influencerait également la production d'hormones stéroïdes comme la testostérone (voir Fukui, 2001), ou les hormones du système immunitaire comme l'Immunoglobuline A, en augmentation lors de la pratique du chant choral (Kreutz, Bongard, Rohrmann, Hodapp, & Grebe, 2004 ; voir aussi Grape, Sandgren, Hansson, Ericson, & Theorell, 2003, pour une étude comparative des effets psychologiques et physiologiques du chant chez des chanteurs professionnels et amateurs).

Ces effets neurophysiologiques, cardiovasculaires et respiratoires peuvent expliquer pour une grande part l'effet analgésique dépendant de la valence émotionnelle des extraits musicaux. Dans l'étude de Roy et collaborateurs (Roy, Peretz, & Rainville, 2008), la résistance à une douleur thermique était augmentée lors de l'écoute de musique plaisante comparativement à une musique à valence plus négative, ou à du silence. Les auteurs proposent que la musique favoriserait la libération d'hormones opioïdes telles que la morphine. De plus, les réactions émotionnelles à la musique induisent des activations des zones cérébrales aussi impliquées dans la régulation de la douleur, telles que l'amygdale, le cortex préfrontal, le cortex cingulaire, et l'ensemble du système limbique (Koelsch, 2010; Peretz, 2010). Une émotion positive véhiculée par une stimulation musicale pourrait donc réguler ces activations et réduire la sensation de douleur.

L'ensemble de ces études suggère que la musique influence les fonctions émotionnelles, physiologiques et végétatives de l'organisme. En choisissant d'écouter certains morceaux, l'auditeur pourrait ainsi contribuer à réguler de façon non invasive son état physiologique et psychologique. Les effets physiologiques de la musique ne se cantonnent cependant pas à ce seul rôle de drogue douce, mais peuvent avoir des répercussions réelles sur la plasticité anatomique et fonctionnelle du cerveau. Selon Fukui et Toyoshima (2008), la musique agirait au niveau cellulaire en favorisant la neurogénèse, la régénération et la réparation des neurones et circuits neuronaux via l'ajustement des sécrétions hormonales de type stéroïdes (comme le cortisol, la testostérone et l'œstrogène), qui sont par ailleurs reconnues comme jouant un rôle dans les processus de plasticité cérébrale.

2. 3. Musique et Plasticité Cérébrale

Les personnes musiciennes ont constitué une population idéale pour comprendre les phénomènes de plasticité liés à l'expertise musicale (voir par exemple Schlaug, 2003, Wan & Schlaug, 2010, ou Habib & Besson, 2008, pour des revues de littérature sur les modifications

anatomiques et fonctionnelles issues de l'expertise musicale). La pratique musicale requiert la séquentialité et la simultanéité de plusieurs tâches : la lecture d'un code symbolique abstrait (la partition), la planification de l'activité motrice bimanuelle, l'intégration d'un feedback multimodal (auditif, proprioceptif, kinesthésique). Elle implique également une précision gestuelle et métrique. Elle met en jeu les processus de mémorisation, voire d'autres fonctions lors d'improvisation. Selon Habib et Besson (, 2008), la pratique musicale répétée modifierait l'organisation des aires corticales relatives à ces fonctions, et ce à 3 niveaux : (1) augmentant le nombre de neurones impliqués, (2) favorisant leur degré de synchronisation temporelle, et (3) augmentant le nombre et la force des connexions synaptiques excitatrices et inhibitrices.

Les effets de l'expertise musicale s'observent tout d'abord au niveau des structures cérébrales auditives. Sur le plan macroscopique, certaines régions cérébrales diffèrent par leur densité et/ou leur surface. Les gyri de Heschl des musiciens professionnels présentent bilatéralement un volume supérieur de 130 % comparativement aux sujets non musiciens. Le planum temporale gauche des musiciens serait également plus développé, en particulier s'ils ont l'oreille absolue (Schlaug, Jäncke, Huang, & Steinmetz, 1995). La pratique musicale affecte également la manière dont sont traités les sons. Au niveau sous cortical, dans le tronc cérébral, le traitement de la fréquence fondamentale des sons est soutenu par une activation plus importante des colliculi inférieurs chez les musiciens (Musacchia, Sams, Skoe, & Kraus, 2007 ; voir Kraus & Chandrasekaran, 2010, pour revue). La comparaison des patterns électrophysiologiques corticaux révèle que les musiciens réagissent davantage aux manipulations de fréquence fondamentale et harmoniques que les novices, évoquant une plus grande sensibilité au spectre des sons (Shahin, Roberts, Pantev, & Aziz, 2007). Parallèlement, les musiciens montrent une réponse neuronale plus importante au niveau du cortex auditif droit pour le timbre de l'instrument qu'ils pratiquent, comparativement à d'autres timbres (Pantev, Roberts, Schulz, Engelien, & Ross, 2001). L'écoute passive de sons instrumentaux (piano) produit une activation corticale plus forte que celle de sons purs (dipôles plus amples de 21 à 28%) pour les musiciens (Pantev, Oostenveld, Engelien, Ross et al., 1998). D'une manière générale, les musiciens sont plus sensibles à la structure acoustique des sons musicaux, par exemple pour la discrimination de tons ou de changements subtils de contours mélodiques (par exemple, Bidelman, Krishnan, & Gandour, 2011 ; voir Besson, Schön, Moreno, Santos, & Magne, 2007, pour revue), y compris dans le vieillissement (Zendel & Alain, 2008). Ils répondent aussi à des violations de contour mélodique et de structures d'intervalles par des amplitudes plus grandes d'onde MMN (MisMatch Negativity, reflétant la détection involontaire d'éléments déviants ; Pantev et al., 2003).

L'activité sensori-motrice de la pratique musicale amène aussi à une réorganisation cérébrale. Les cartes corticales somesthésiques sont « façonnées » par le type d'instrument pratiqué. Elbert et collaborateurs (Elbert et al., 1995) ont observé une extension de la surface corticale occupée pour la représentation des deux derniers doigts de la main gauche, et en particulier de l'auriculaire, chez des violonistes (comparativement à des adultes non musiciens). De la même manière, la représentation somatosensorielle des lèvres des trompettistes est plus développée (Pantev et al., 2003). La pratique musicale modifie également les régions motrices. Par exemple, le gyrus précentral des non musiciens montre généralement une asymétrie en faveur de l'hémisphère gauche (dominant) ; cette asymétrie est réduite chez les musiciens (Amunts et al., 1997).

La pratique musicale modifierait aussi la densité de la matière blanche dans l'hippocampe, impliqué dans la mémoire à long terme déclarative (Groussard et al., 2010). De plus, les musiciens recruteraient un réseau neuronal plus étendu que les non musiciens lors d'une tâche de mémoire sémantique musicale (reconnaissance de la familiarité de mélodies). Les auteurs proposent que ce pattern d'activation reflète une modification

fonctionnelle, avec une différenciation dans les stratégies mnésiques, induite par l'expertise musicale (voir aussi Herdener et al., 2010).

Ces effets d'expertise sont également visibles chez les enfants. Une étude transversale menée chez des enfants de 9 à 11 ans a montré une supériorité du volume de la substance grise dans la région du cortex sensorimoteur (liée à la pratique motrice) et des régions occipitales (liée à la lecture de partitions) chez les enfants musiciens après 4 ans de pratique en moyenne, comparativement aux enfants non musiciens (Schlaug, Norton, Overy, & Winner, 2005).

La pratique musicale induirait aussi une augmentation du volume de substance grise au niveau des aires périrolandiques (pariétale antérieures supérieures et cortex prémoteur) du gyrus temporal inférieur et de régions visuelles, régions interconnectées assurant l'intégration des informations sensorielles multimodales (Gaser & Schlaug, 2003). Concernant la substance blanche, la partie antérieure du corps calleux qui assure la communication inter-hémisphérique des aires primaires sensorimotrices, prémotrices, motrices supplémentaires, et préfrontales est significativement plus développée chez les musiciens. Les aires pariétales, temporales et occipitales communiquent par une partie plus postérieure du corps calleux, également de taille plus importante chez les musiciens (Lee, Chen, & Schlaug, 2003).

Notons cependant que les études comparant les musiciens et non musiciens sont souvent des études transversales. De ce fait, les observations qui en sont tirées sont corrélationnelles, et ne permettent pas de conclure d'un effet direct de l'entraînement musical sur l'anatomie et le fonctionnement du cerveau ; ces effets pourraient être dus également à des variables confondantes (et difficilement contrôlables), comme le niveau socio-culturel et de scolarité. Elles ne permettent pas non plus d'écarter l'hypothèse que ces différences seraient innées, et donc la cause – plutôt que la conséquence – de cette expertise. Des études longitudinales comparant une population homogène et aléatoirement répartie en deux groupes équivalents suivant différentes conditions d'entraînement sont donc indispensables pour aborder ces questions. De plus, bien que certaines études suggèrent que les différences neuroanatomiques et fonctionnelles observées entre les musiciens et les non musiciens semblent liées à la précocité et à la durée de la formation musicale (par exemple, Penhune, Watanabe, & Savion-Lemieux, 2005; Watanabe, Savion-Lemieux, & Penhune, 2007), les études longitudinales ont permis de montrer que des effets de plasticité peuvent également être observés à court terme, chez l'enfant comme chez l'adulte. Après 15 mois d'entraînement musical (à raison d'une demi-heure de leçon de piano privée par semaine), des enfants non musiciens de 6 ans ont montré des changements anatomiques dans les aires auditives et motrices, corrélés avec une amélioration de ces habiletés dirigées vers la musique (Hyde et al., 2009). De même, après un an d'apprentissage musical (méthode Suzuki), des enfants non musiciens de 4 à 6 ans présentaient des réponses neuronales (N250) plus précoces dans l'hémisphère gauche à l'écoute de sons de violon comparativement à un bruit de même enveloppe temporelle (Fujioka et al., 2006). Chez l'adulte, il a été observé chez des étudiants en musique une augmentation de la réponse neuronale de l'hippocampe dans une tâche de discrimination acoustique après un entraînement de deux semestres aux habiletés auditives (comparativement à avant l'entraînement ; Herdener, Esposito, Di Salle, Boller, Hilti, et al., 2010). À plus petite échelle encore, et chez des personnes sans formation musicale, deux semaines et demi d'entraînement de discrimination de fréquences (15 sessions à raison d'une par jour, 6 jours par semaine) ont suffi pour observer une augmentation de l'amplitude des potentiels évoqués auditifs N1c et P2 (en particulier dans l'hémisphère gauche pour la N1c, Bosnyak, Eaton, & Roberts, 2004). De même, l'onde MMN dans le cortex auditif était plus large suite à un entraînement de deux semaines à jouer des séquences musicales sur un piano chez des adultes non musiciens (Lappe et al., 2008). Après une semaine d'entraînement intensif de discrimination de fréquences proches, la réponse

hémodynamique au niveau du cortex auditif a diminué chez les participants dont les performances perceptives ont progressé (suggérant une facilitation de traitement de ces stimuli ; Jäncke, Gaab, Wüstenberg, Scheich, & Heinze, 2001). Enfin, la suppression de la fréquence 1 kHz dans des pièces musicales écoutées 3 heures par jour pendant 3 jours menait déjà à une diminution de réponse neuronale à cette fréquence (Pantev, Wollbrink, Roberts, Engelien, & Lütkenhöner, 1999). Ces dernières observations chez des sujets adultes montrent que le cerveau reste plastique y compris après maturation (voir Wan & Schlaug, 2010), ce qui est important à considérer dans le cadre de la stimulation ou remédiation cognitive chez l'adulte et la personne âgée.

2. 4. Résumé

L'écoute ou la pratique musicale soutenue a des répercussions importantes sur la réactivité et l'organisation du cerveau humain. Non seulement le bébé semble naître avec des prédispositions pour le traitement de la musique, mais l'activité musicale a aussi des effets sur le fonctionnement neurophysiologique et l'organisation corticale au niveau anatomique et fonctionnel. De cette manière, la musique active et modifie un grand nombre d'aires cérébrales. On sait aujourd'hui qu'il n'y a pas de « centre cérébral » dédié spécifiquement au traitement de la musique (Altenmüller, 2001). Les différentes composantes de la musique (auditive, temporelle et rythmique, émotionnelle, etc.) requièrent différents systèmes généraux de traitement. Ainsi, l'activité musicale peut impliquer des activations corticales bilatérales des aires auditives, somato-sensorielles, motrices, visuelles et visuo-spatiales, et implique également un large réseau fronto-pariétal. Elle modifie l'anisotropie des fibres de la substance blanche, notamment dans le corps calleux et le faisceau pyramidal. Enfin, au niveau sous-cortical, elle active et modifie également des zones plus archaïques comme le tronc cérébral.

Ainsi, si l'écoute et la pratique musicales influencent la réactivité et l'organisation de zones cérébrales qui ne sont pas spécifiques à l'activité musicale, on peut supposer qu'une activité musicale, en plus de développer les compétences dirigées vers la musique, va en même temps stimuler et faciliter d'autres fonctions cérébrales (Patel, 2010). Cet effet de transfert vers les compétences non musicales s'observe à la fois chez le musicien et le non musicien, dans des activités mentales perceptives, motrices ou cognitives.

3. Musique et Compétences non Musicales

La musique comporte différentes composantes, telles que la hauteur fréquentielle, le rythme et la métrique, l'organisation syntaxique. Ces différentes dimensions du stimulus musical résonnent chacune avec une ou plusieurs compétences mentales générales (non spécifiques au traitement de la musique). Par exemple, le traitement de la hauteur s'appuie sur les capacités perceptives auditives, et probablement aussi sur les habiletés spatiales, alors que le rythme est plus étroitement lié aux habiletés motrices, et que le traitement de l'organisation syntaxique semble partager des ressources avec le traitement du langage. L'activité musicale – écoute et/ou pratique – est également fortement basée sur les différentes formes de mémoire (implicite, autobiographique, sémantique, verbale, procédurale). La combinaison de ces composantes musicales donne au signal une valeur émotionnelle (valence et intensité, dynamique). Ainsi, la richesse de la structure du matériel musical permet de stimuler un grand nombre de compétences mentales de manière simultanée, et donc d'améliorer potentiellement à la fois le fonctionnement de chacune, et leur coordination. Un

effet facilitateur d'une activité musicale sur une compétence non musicale peut être attribué à l'addition ou l'interaction de ces relations entre composantes musicales et compétences mentales générales chez le sujet normal.

3. 1. Perception

Du point de vue perceptif, tout d'abord, l'entraînement des musiciens leur permet non seulement de mieux discriminer des caractéristiques musicales, mais leurs compétences auditives sont aussi au service du traitement d'autres types de stimuli auditifs qui partagent des composantes acoustiques similaires. Par exemple, dans une tâche de discrimination de timbres vocaux (voix d'hommes, de femmes, de filles et de garçons ; Chartrand & Belin, 2006), les musiciens obtiennent de meilleures performances que les non musiciens. Ils prennent aussi plus de temps pour donner leurs réponses. Cette observation pourrait être interprétée comme un investissement moindre dans la tâche de la part des non musiciens. Les auteurs suggèrent cependant qu'elle traduirait une stratégie de traitement différente chez les musiciens, plus en profondeur. De plus, les sujets musiciens chanteurs sont ceux qui obtiennent les meilleurs résultats, ce qui suggère un effet d'expertise du traitement auditif de la voix humaine.

De nombreuses autres études se sont intéressées à la supériorité des musiciens pour la perception de changements fins dans des stimuli linguistiques. Dans une étude d'IRMf, Oeschlin et collaborateurs (Oeschlin, Meyer, & Jäncke, 2010) ont observé que les musiciens qui ont l'oreille absolue montraient une activation plus importante du sulcus temporal supérieur dans une tâche de perception de phrases manipulées sur le plan lexical et/ou prosodique. Les auteurs proposent que les modifications neuroanatomiques observées chez les musiciens ne soutiendraient pas uniquement une augmentation des performances du traitement de la musique, mais permettrait aussi des capacités de segmentation acoustiques plus générales.

Les habiletés musicales seraient également corrélées avec les habiletés phonologiques dans l'apprentissage d'une seconde langue (Slevc & Miyake, 2006). D'autres expérimentations montrent qu'il existe une corrélation entre l'expertise musicale et la perception de la prosodie du langage. Les musiciens détectent mieux des incongruités prosodiques fines (augmentation de la fréquence de 35 % en fin de phrase) dans une langue qui leur est étrangère ; ils sont aussi plus rapides (de 300 ms en moyenne) que les non musiciens pour effectuer cette tâche (Marques, Moreno, Castro, & Besson, 2007). De même, lorsque des musiciens doivent comparer la prosodie de phrases à des mélodies présentées ensuite, ils obtiennent de meilleures performances que les non musiciens, que ce soit pour leur langue maternelle ou une langue étrangère (Thompson, Schellengerg, & Husain, 2003). L'expertise musicale est aussi corrélée avec les habiletés d'apprentissage des langues tonales (où des variations de prosodie donnent des sens différents à un même mot ; Lee & Hung, 2008; Marie, Delogu, Lampis, Belardinelli, & Besson, 2011; Wong, Skoe, Russo, Dees, & Kraus, 2007). Enfin, les musiciens détectent davantage que les non musiciens les modifications de hauteur permettant de discriminer les énoncés interrogatifs dans leur propre langue (Magne, Schön, & Besson, 2006). Les modifications de perception de la prosodie peuvent subvenir après une courte période : chez des enfants non musiciens de 8 ans, un entraînement musical de 6 mois permettrait déjà un traitement de la prosodie plus sensible (Moreno et al., 2009). Parallèlement, certaines personnes amusiques (présentant un trouble des habiletés musicales perceptives ou productives) peuvent éprouver des difficultés de discrimination de changements prosodiques fins dans des phrases interrogatives (Patel, Wong, Foxton, Lochy, & Peretz, 2008).

Enfin, les musiciens âgés montrent un déclin lié à l'âge moins important dans des tâches de détection de signal manquant ou perception de parole dans le bruit par rapport aux non musiciens vieillissants (Zendel & Alain, 2011). Ces observations montrent donc des liens étroits pour le traitement acoustique de la musique et celui du langage (Besson, Chobert, & Marie, 2011, pour revue).

Les compétences auditives des musiciens sont corrélées à d'autres types de performances perceptives, comme les habiletés visuo-spatiales. Les enfants qui ont suivi un apprentissage musical entre la naissance et l'âge de 7 ans montrent de meilleures performances que des enfants non musiciens aux épreuves de raisonnement spatial de l'échelle Stanford-Binet (Bilhartz, Bruhn, & Olson, 2000). Chez l'adulte, les musiciens qui ont l'oreille absolue sont les meilleurs dans la tâche visuo-spatiale des figures cachées (Costa-Giomi, Gilmour, Siddell, & Lefebvre, 2001). Dans une autre étude (Brochard, Dufour, & Després, 2004), des participants musiciens et non musiciens devaient localiser un point lumineux par rapport à une ligne de référence présente ou absente (condition « imagerie mentale »). Les musiciens ont démontré des temps de réaction inférieurs (en moyenne, 380 ms pour les musiciens contre 440 ms chez les non musiciens), en particulier lorsque la ligne de référence était un axe vertical. Les musiciens commettent aussi moins d'erreurs de localisation que les non musiciens dans la condition « imagerie mentale ». Ces observations peuvent être expliquées par le fait que les habiletés spatiales semblent jouer un rôle dans le codage de la hauteur des notes. Par exemple, l'identification de la hauteur de deux sons grave ou aigu est facilitée si le son aigu correspond à une touche située au dessus de la touche correspondant au son grave (et non l'inverse), et ce y compris chez les non musiciens. Ces observations suggèrent que la représentation des notes, tout comme la représentation des chiffres, est spatialement (et verticalement) organisée (voir par exemple Lidji, Kolinsky, Lochy, & Morais, 2007; Rusconi, Kwan, Giordano, Umiltà, & Butterworth, 2006).

3. 2. Motricité

Sur le plan moteur, les études chez les musiciens mettent en évidence un rapport direct entre la fonction motrice entraînée et le transfert de compétences sur des tâches non musicales utilisant les mêmes ressources. Par exemple, Jäncke et collaborateurs (Jäncke, Schlaug, & Steinmetz, 1997) ont montré que les musiciens (pianistes) droitiers, démontraient une asymétrie bimanuelle (mesurée avec un questionnaire de latéralité manuelle) moins importante que les non musiciens droitiers, du fait de l'entraînement de leur main gauche dans leur pratique musicale. L'étude montrait aussi de meilleures performances chez les pianistes que chez les musiciens d'instruments à cordes dans une tâche de *tapping* (i. e., taper du doigt en rythme avec une stimulation auditive régulière ; voir par exemple Drake, Penel, & Bigand, 2000), suggérant là encore un effet spécifique de l'entraînement. Chez l'enfant, les capacités de motricité fines, évaluées par le *Bruinsky-Oseretsky Motor Proficiency Test*, étaient améliorées après 2 années d'apprentissage du piano (comparativement à un groupe contrôle ne suivant pas cet entraînement ; Costa-Giomi, 2005), en particulier pour le subtest de rapidité de la réponse motrice. Il est cependant difficile ici de déterminer la spécificité de la musique dans cet effet. Afin de tester cette question, il serait important que le groupe contrôle soit actif, et suive un autre type d'entraînement, afin de dissocier l'effet de la musique de l'effet simple d'un entraînement moteur ou même d'un entraînement quelconque (*effet Hawthorne*).

Les liens entre musique et motricité sont également bien documentés chez les sujets non musiciens. En , 1888, Nietzsche disait "We listen to music with our muscles". En effet, certains extraits musicaux favoriseraient la tonicité du corps et l'amélioration spontanée de la

posture (Forti, Filipponi, Di Berardino, Barozzi, & Cesarani, 2010). De nombreuses études se sont intéressées à la composante rythmique, et la capacité de synchronisation avec une stimulation musicale. Suivre un rythme est une habileté très robuste d'un individu à l'autre (Patel, Iversen, Chen, & Repp, 2005) et peu de cas de personnes arythmiques ont été rapportés (Overy & Turner, 2009 ; voir Phillips-Silver et al., 2011, pour une étude de cas). De plus, le corps se synchronise de manière automatique avec un son régulier (Molinari, Leggio, De Martin, Cerasa, & Thaut, 2003), jusqu'à, par exemple, synchroniser sa respiration à un rythme musical (Haas, Distenfeld, & Axen, 1986). Les mécanismes de coordination et de maintien en phase avec le tempo sont particulièrement précis, et ce processus de synchronisation est lié de manière robuste avec la modalité auditive. Par exemple, pour différents patterns rythmiques, la synchronisation du *tapping* est plus précise et mieux maintenue pour un rythme auditif qu'un rythme visuel (flash lumineux ; Patel et al., 2005; Repp & Penel, 2004). De plus, la simple écoute d'un pattern rythmique active des zones cérébrales motrices, y compris lorsque les sujets n'ont aucune tâche motrice à effectuer durant cette stimulation (Brown, Martinez, & Parsons, 2006; Chen, Penhune, & Zatorre 2008). L'influence d'une stimulation auditive rythmée sur la marche semble d'autant plus importante si cette stimulation est musicale (plutôt qu'un rythme seul joué par un métronome) : à cadence égale, les participants font des pas plus grands quand ils synchronisent leur démarche dans la condition musicale (Styns, Van Noorden, Moelants, & Leman, 2007). La musique, via l'entraînement moteur ou la capacité de synchronisation avec un rythme auditif, peut donc stimuler la motricité et les mouvements dirigés vers un but non musical (tels que la dextérité manuelle ou la marche).

3. 3. Langage

L'activité musicale n'est pas seulement motrice, elle est aussi étroitement en lien avec plusieurs compétences cognitives. Beaucoup d'études ont cherché à montrer les similarités et différences entre son traitement et celui du langage. Plusieurs cas de double dissociation ont été observés lors d'atteintes du langage (aphasie) et des habiletés musicales (amusie), suggérant un niveau d'indépendance entre ces deux compétences (pour des revues, voir Peretz, 2002, 2009). Pourtant, il a également été démontré que le traitement de la musique et celui du langage partagent un certain nombre de ressources neuronales (Callan et al., 2006; Koelsch, 2005; Tillmann, Koelsch, Escoffier, Bigand, Lalitte, Friederici et al., 2006 ; voir toutefois Rogalsky, Rong, Saberi, & Hickok, 2011, pour une position divergente). Ces liens expliqueraient qu'un entraînement effectué sur un stimulus musical puisse avoir un effet facilitateur sur le traitement d'un stimulus linguistique.

Au niveau fonctionnel, des liens ont été montrés entre les habiletés musicales et plusieurs aspects du langage, qui vont au-delà des effets purement perceptifs (décrits ci-dessus). Moreno et collaborateurs (, 2009) ont mis en évidence une amélioration de la lecture de mots complexes après un entraînement musical de 6 mois chez des enfants non musiciens de 8 ans (voir aussi Butzlaff, 2000, pour une méta-analyse sur la corrélation entre les habiletés musicales et de lecture chez l'enfant). Dans une étude antérieure chez des enfants de 4 et 5 ans (Anvari, Trainor, Woodside, & Levy, 2002), des relations étroites ont été trouvées entre les habiletés musicales et des épreuves de conscience phonologique, qui impliquent la possibilité de segmenter et manipuler les sons de la langue.

A un niveau basique de l'acquisition du langage, l'apprenant doit segmenter les flux de discours continu (phrases entendues dans le langage parlé) en unités pertinentes (mots qui les composent ; voir Saffran, Newport, & Aslin, 1996). Or, un flux chanté est plus facile à segmenter qu'un flux parlé, si la mélodie utilisée est cohérente avec l'organisation des unités

qui le composent (Schön et al., 2008). La structure musicale semble donc à même de supporter l'organisation linguistique et d'en renforcer sa compréhension par le sujet.

Enfin, musique et langage sont deux systèmes syntaxiques, c'est-à-dire organisés selon une structure séquentielle hiérarchique. Plusieurs études, notamment en neuroimagerie, montrent un chevauchement des traitements syntaxiques effectués pour la musique et pour le langage. Par exemple, des réponses très similaires sont observées en réaction à une incongruité de syntaxe dans les deux domaines (Patel, Gibson, Ratner, Besson, & Holcomb, 1998). Les musiciens adultes répondent également aux violations syntaxiques musicales par une ERAN plus ample (réponse électrophysiologique, localisée dans l'hémisphère droit, correspondant au traitement cognitif d'une violation syntaxique musicale ; Miranda et Ullman, 2007), ainsi qu'aux violations syntaxiques linguistiques par une ELAN plus marquée (réponse homologue pour les stimuli linguistiques, localisée dans l'hémisphère gauche ; Friederici et Kotz, 2003). Les localisations cérébrales de ces patterns de réponses correspondent aux spécialisations hémisphériques du traitement des signaux auditifs (typiquement : traitement temporel rapide à gauche, crucial dans la compréhension des stimuli linguistiques, et traitement spectral à droite, fondamental pour le traitement mélodique ; voir Koelsch et al., 2001), mais la similarité de la réponse observée suggère un même mécanisme pour le traitement des incongruités de syntaxe dans les deux domaines. Les mêmes réponses électrophysiologiques sont retrouvées chez des enfants de 10-11 ans (Jentschke & Koelsch, 2009).

La mise en évidence de processus communs entre musique et langage est également pertinente pour comprendre les bases du traitement de ces deux stimuli, alimentant le débat de leur fonctionnement partagé versus modulaire (indépendant). Les liens objectivés remettent notamment en cause le caractère encapsulé (indépendant ou imperméable) de ces traitements spécifiques (comme le codage de la hauteur tonale ; Peretz, 2006). Les travaux actuels contribuent à déterminer la part de partage et de spécificité pour ces deux types de traitement (pour une discussion autour de cette question, voir Patel, 2008; Peretz, 2009). Patel (Patel, 2011) propose que le transfert entre un entraînement musical et les habiletés de traitement linguistique est observé lorsque l'entraînement est répété, porte sur des habiletés complexes, dont le traitement est commun aux deux domaines (facteurs acoustiques), et lorsque la musique favorise l'attention et la motivation du sujet (hypothèse *OPERA*).

3. 4. Mémoire

Les liens entre la musique et la mémoire (non musicale) sont multiples et peuvent s'observer dans différents registres de mémoire. Des effets de transfert de l'expertise musicale sur du matériel non musical ont été observés en mémoire verbale, pour laquelle les musiciens montrent de meilleures performances que les non musiciens, chez l'adulte (Brandler & Rammsayer, 2003; Chan, Ho, & Cheung, 1998) et chez l'enfant (Ho, Cheung, & Chan, 2003).

L'idée que la musique puisse servir de moyen mnémotechnique pour l'acquisition d'autres informations a une longue histoire. Au Moyen Âge, les ménestrels transmettaient l'histoire à travers des chansons (Calvert & Tart, 1993; Rubin, 1995). Aujourd'hui encore, dans certaines sociétés traditionnelles, on véhicule via la musique la mémoire de l'historique culturel qui contribue à l'identité du groupe social (Bonini-Baraldi, 2008). A l'école, les enfants apprennent l'alphabet chanté, et plusieurs auteurs ont proposé des procédures d'apprentissage musicales, par exemple, un karaoké pour apprendre les règles de la physique (Dickson & Grant, 2003), ou l'utilisation du chant pour l'acquisition d'une seconde langue (Medina, 1993). Les études scientifiques qui ont cherché à comparer rigoureusement

l'apprentissage de paroles récitées ou chantées montrent néanmoins des résultats divergents (voir par exemple McElhinney & Annett, 1996, versus Racette & Peretz, 2007). Il semble que la musique associée à l'élément à mémoriser soit déterminante. En particulier, si la mélodie est trop complexe, ou mal associée aux paroles, sa présence peut alourdir l'apprentissage. Cependant, à long terme, l'avantage de la condition musicale apparaît plus clairement (Calvert & Tart, 1993; Rainey & Larsen, 2002). Outre le fait que l'association permet un encodage plus riche et plus profond, la mélodie peut représenter un bon support pour la mémorisation d'un texte car elle attire l'attention sur les caractéristiques de surface du texte (Wallace, 1994). La structure rythmique, l'organisation séquentielle des phrases musicales, les variations de la mélodie, sont autant d'indices qui renseignent sur la structure du texte (longueur des lignes, nombre de syllabes par lignes, nombre de lignes par vers, etc. ; voir aussi Tillmann & Dowling, 2007, pour une étude concernant l'importance du rythme dans la mémorisation à court terme de textes). La structure rythmique facilite également le découpage du texte en unités pertinentes (*chunks*, voir McElhinney & Annett, 1996), ce qui favoriserait le passage des informations en mémoire de travail et en mémoire à long terme. De plus, le lien étroit entre musique, émotions et mémoire peut également rendre compte de cet effet (Nairne, Thompson, & Pandeirada, 2007; Sitoh & Tien, 1997). La musique est un moyen privilégié pour véhiculer des émotions, et les émotions auraient un rôle crucial pour la mémorisation (Kensinger & Corkin, 2003) ; utiliser les émotions musicales pourrait donc maximiser les performances de mémorisation (Jäncke, 2008).

Il est également fréquent de pouvoir associer à certaines musiques des événements épisodiques autobiographiques, la musique étant connue pour son fort pouvoir évocateur (Sacks, 2006). Janata et collaborateurs (Janata, Tomic, & Rakowski, 2007) ont testé les souvenirs autobiographiques évoqués par la musique à l'écoute d'un large corpus de musique populaire : 30 % des chansons évoquaient des souvenirs personnels aux participants, à un niveau spécifique ou plus général. Les connaissances sémantiques qui y étaient associées (titre, artiste, époque, paroles) étaient corrélés avec les émotions ressenties pour ces morceaux, surtout chez les personnes les plus âgées (Schulkind, Hennis, & Rubin, 1999).

3. 5. Effet général sur la cognition

Dans un autre registre cognitif, l'instruction musicale est corrélée positivement à la plupart des subtests d'intelligence (QI global) et au niveau scolaire, avec un effet de la durée de l'apprentissage (voir Schellenberg, 2006, avec une cohorte de 147 enfants âgés de 6 à 11 ans). À plus court terme également, Schellenberg (, 2004) a montré une amélioration légère mais significative du QI chez 132 enfants de 6 ans après un an de leçons musicales hebdomadaires (comparativement à des cours de théâtre, dans une étude contrôlée et randomisée).

Différentes hypothèses explicatives peuvent rendre compte de ces observations. D'une part, la pratique musicale requiert différents processus non spécifiques et en améliore le fonctionnement et la coordination. D'autre part, les effets bénéfiques observés sur le fonctionnement cognitif et moteur peuvent être expliqués par le fait que la musique peut agir comme un « stimulateur », éveillant l'ensemble de nos compétences. Le point de départ des études sur les effets de l'écoute musicale sur la cognition est celle de Rauscher et collaborateurs (Rauscher, Shaw, & Ky, 1993), qui avançait que l'écoute de la Sonate pour deux pianos en ré majeur K448 de Mozart augmentait à court terme le raisonnement spatial. Popularisé sous le nom d' « effet Mozart », ce résultat a suscité à la fois un engouement social et commercial, et une polémique scientifique. Les études qui ont suivi ont précisé que la musique de Mozart n'est pas spécifiquement reliée aux habiletés spatiales (voir Latendresse,

Larivée, & Miranda, 2006, pour une revue portant sur 26 études). Par exemple, ces habiletés étaient améliorées chez des adolescents suite à l'écoute musique populaire (comparativement à l'écoute de Mozart ou à du silence ; Schellenberg & Hallam, 2005). En revanche, une musique plus triste (composition d'Albinoni) ne suscite pas d'amélioration de performances (Thompson, Schellenberg, & Husain, 2001). Il semble donc que l'effet observé soit davantage relié à la dimension psychoaffective et dynamique de l'œuvre (Steele et al., 1999). De plus, les effets positifs observés peuvent porter sur différentes tâches et fonctions cognitives. Par exemple, chez des enfants japonais, l'écoute de comptines traditionnelles a mené à une plus grande créativité dans les dessins effectués (Schellenberg, Nakata, Hunter, & Tamoto, 2007). On peut donc en conclure qu'une musique pertinente pour un individu peut améliorer une variété d'habiletés mentales. Ce phénomène peut être expliqué par l'effet émotionnel et physiologique lié à l'écoute musicale (tel que décrit en première partie) ; un état général d'éveil améliorerait de manière aspécifique le fonctionnement de l'individu. Une hypothèse alternative repose sur l'idée que la structure temporelle de la musique favoriserait la rapidité de traitement et le fonctionnement attentionnel (Thaut, Peterson, & McIntosh, 2005).

3. 6. Résumé

En résumé, la musique semble stimuler de manière générale le fonctionnement cognitif de l'individu en jouant sur le réseau émotionnel et de l'éveil. De plus, le traitement de la musique, de par la richesse de la stimulation musicale et la distribution de son traitement, présente des liens fonctionnels étroits avec d'autres compétences non musicales, et les compétences développées sur un matériel musical peuvent être transférées aux compétences non musicales équivalentes (pour d'autres lectures autour de la notion de transfert des habiletés musicales, voir les revues de Besson et al., 2011; Hannon & Trainor, 2007; Moreno et al., 2009 ; Koelsch, 2009). L'addition ou l'interaction de ces effets peut expliquer les bénéfices de l'activité musicale observés à différents niveaux sur le fonctionnement cérébral normal. De ce fait, on peut aussi penser que la musique représente un outil pertinent pour la stimulation du fonctionnement cérébral pathologique en réhabilitation.

4. L'Utilisation de la Musique comme Outil de Thérapie

Les vertus thérapeutiques de la musique sont documentées depuis la Grèce antique, Pythagore étant probablement l'un des premiers musicothérapeutes en occident (Jamblique, 2009). Aujourd'hui, la musique est de plus en plus utilisée dans la pratique clinique, auprès de pathologies très variées (comportementales, psychologiques, psychiatriques, neurologiques, sensorielles, motrices, etc.). Mais ces pratiques sont souvent empiriques, et non systématiquement soutenues scientifiquement par un modèle théorique et une validation expérimentale clairs (randomisation, évaluations en aveugle, qualité des groupes contrôles). Nous verrons dans cette partie que certaines études montrent cependant comment les liens entre composantes musicales et compétences mentales, décrits dans la précédente section, peuvent être utilisés pour la réhabilitation de ces fonctions. De plus, les effets émotionnels et physiologiques de la musique, décrits en première section, sont aussi exploités dans le cadre thérapeutique et ont montré des effets bénéfiques sur les plans de la cognition ou de l'humeur.

4. 1. Remédiation des Troubles Auditifs

La richesse acoustique de la musique peut être utilisée dans le cadre de la stimulation sensorielle, et par exemple dans l'entraînement auditif d'enfants malentendants (Abdi et al., 2001; Rochette & Bigand, 2009). Dans l'étude de Rochette et collaborateurs, les enfants ont été entraînés, à travers différents jeux interactifs, à la discrimination et l'identification de sons, l'analyse de scènes auditives, et à la mémorisation auditive. Les stimuli appartenaient à 4 catégories de sons : sons de l'environnement, voix, sons abstraits et musique. Après 16 semaines, les enfants ont montré des progrès sur les tâches entraînées (sauf en analyse de scène auditive, où la progression était non significative), ainsi qu'un transfert des bénéfices sur du matériel linguistique non entraîné (par exemple, en discrimination phonétique). Cette étude ne comportant pas de groupe contrôle, une troisième session de mesure a été menée 6 mois plus tard, afin d'identifier les effets de maturation naturelle qui auraient pu être la cause des améliorations de performance constatées. Pour la plupart des mesures (identification et discrimination sur le matériel entraîné, ainsi qu'en discrimination phonétique) les scores ont augmenté avec l'entraînement, puis sont restés constants dans les 6 mois suivants, ce qui montre que les améliorations étaient bien dues à l'entraînement, et que les progrès acquis ont été maintenus à long terme. Seule la mesure de mémoire auditive montre une diminution entre la fin de l'entraînement et la mesure à 6 mois, suggérant qu'une période d'entraînement de 16 semaines, chez des enfants principalement utilisateurs de la langue des signes française, est peut-être trop courte pour obtenir des effets qui soient maintenus à long terme pour cette mesure. Une étude menée actuellement cherche enfin à préciser les effets plus spécifiques du matériel utilisé avec un entraînement exclusivement musical.

4. 2. Remédiation des Troubles Sensori-moteurs

Compte tenu de ses liens avec la motricité, la musique représente également un support privilégié pour la réhabilitation des troubles sensori-moteurs. Dans deux études menées successivement (Altenmüller, Marco-Pallares, Münte, & Schneider, 2009; Schneider, Schönle, Altenmüller, & Münte, 2007), des patients victimes d'un accident vasculaire cérébral, non musiciens, ont appris à jouer des gammes et des mélodies simples sur un piano et/ou sur différents éléments d'une batterie électronique reproduisant les notes de la gamme. L'objectif était double : entraîner la motricité digitale (piano) et la motricité plus globale du membre supérieur parétique (batterie). L'entraînement s'est déroulé sur une période de 3 semaines (15 séances), en plus des séances de thérapie traditionnelle. Après apprentissage, les patients entraînés étaient plus rapides, plus précis et avaient des gestes plus continus que ceux qui n'avaient pas suivi cet entraînement (thérapie traditionnelle seulement). Ils rapportaient également moins de problèmes moteurs dans la vie quotidienne. De plus, ces effets d'amélioration de performances semblaient liés à des modifications de patterns EEG dans le cortex moteur (Altenmüller et al., 2009). Toutefois, il est difficile de conclure que les progrès manifestés par les patients soient directement imputables à l'utilisation de la musique plutôt qu'aux effets d'une pratique motrice bimanuelle, qui s'oppose à l'approche traditionnelle d'immobilisation du membre valide. De plus, les participants du groupe expérimental ont reçu plus d'entraînement que ceux du groupe contrôle. Les futures études devront donc comparer l'apport de la musique dans la remédiation des troubles sensori-moteurs avec d'autres stratégies, comme par exemple l'utilisation de jeux vidéos ou autres entraînements ludiques requérant la même motricité digitale fine et bimanuelle, et à quantités d'entraînement égales.

D'autres résultats intéressants ressortent des études portant sur la maladie de Parkinson et la remédiation de la marche (voir Lim et al., 2005, pour revue). La vélocité et la cadence de la démarche ainsi que la longueur des pas effectués sont améliorées par l'utilisation d'un indicage auditif régulier lors de la marche (Thaut et al., 1996). Les meilleures performances pour les sujets parkinsoniens traités ou non traités pharmacologiquement sont obtenues lorsque la marche est synchronisée avec une stimulation auditive rythmique plus rapide de 10 % par rapport à leur cadence de base (McIntosh, Brown, Rice, & Thaut, 1997). La composante rythmique de la musique peut donc jouer un rôle déterminant de réactivation du système moteur. De plus, la synchronisation avec une source auditive permettrait de ramener la production motrice à un niveau plus automatique, connu pour être mieux préservé que la production contrôlée chez les patients cérébrolésés. Notons cependant que la plupart de ces études utilisent un indicage rythmique auditif de type métronome, et non une réelle stimulation musicale. L'étude de Satoh et Kuzuhara (, 2008) est axée sur l'utilisation de la musique et montre de la même manière que la marche des patients Parkinsoniens s'améliore lorsque les sujets ont été entraînés à chanter mentalement en se déplaçant ; l'étude manque toutefois d'un groupe contrôle pour objectiver l'effet spécifique de cet entraînement.

D'autres travaux suggèrent un effet délétère de l'écoute musicale sur la marche des patients (voir Brown, De Bruin, Doan, Suchowersky, & Hu, 2010) ; cependant, dans cette étude, les extraits utilisés étaient choisis en fonction des préférences musicales des personnes, ce qui n'est pas forcément adapté en terme de rythme et cadence, et probablement plus susceptible de détourner leur attention de l'exercice moteur à effectuer.

4. 3. Remédiation des Troubles du Langage

Les composantes rythmique et mélodique de la musique sont également utilisées dans la remédiation du langage. Notamment, la MIT (Melodic Intonation Therapy) est une technique qui vise à améliorer la production verbale des personnes aphasiques (Sparks & Holland, 1976). Elle se base sur l'observation que certains patients aphasiques prononcent plus facilement des mots en chantant qu'en parlant, en particulier s'ils les produisent à l'unisson avec un modèle (Racette, Bard, & Peretz, 2006). Dans la MIT, on utilise le chant à l'unisson comme point de départ pour entraîner la production de phrases, revenant ensuite progressivement à une production parlée autonome (l'étape intermédiaire étant le parlé-chanté, ou *Sprechgesang*). De plus, le battement du rythme avec la main accompagne la production vocale. Cette stratégie se montre plus efficace que l'entraînement à la simple répétition de phrases, en particulier dans les mesures à long terme (jusqu'à 5 semaines après thérapie ; Wilson, Parsons, & Reutens, 2006). Différentes hypothèses peuvent expliquer l'effet bénéfique de cette technique. Outre le plaisir des patients à chanter, il semble que la synchronisation rythmique avec un modèle facilite la production, probablement via une interface auditivo-motrice favorisant là encore l'automatisme de la production. Des recherches récentes ont aussi montré que le chant engage un réseau fronto-temporal bilatéral, impliqué dans le contrôle des mouvements oro-faciaux et articulatoires (Meister, Buelte, Staedtgen, Boroojerdi, & Sparing, 2009). Une autre hypothèse explicative concernerait l'activation de neurones miroirs, impliqués dans la perception et la compréhension d'actions motrices et dans des processus cognitifs plus complexes comme l'imitation et le langage.

Enfin, chez des enfants dyslexiques, des exercices musicaux (dont le chant) pratiqués pendant 15 semaines, ont permis d'améliorer les mesures de reproduction de structures rythmiques (*tapping*), de traitement auditif rapide et de conscience phonologique, domaines toujours identifiés comme déficitaires dans cette population (Overy, 2003 ; voir Habib &

Besson, 2008, pour une discussion de l'utilisation de la musique pour la remédiation du langage chez l'enfant).

4. 4. Remédiation des Troubles Mnésiques

Les liens entre musique et mémoire autobiographique sont souvent exploités dans le domaine de la démence, dans les thérapies dites de « réminiscence ». L'idée est que l'écoute de certains morceaux musicaux correspondant à une période de vie de l'individu permet souvent la remémoration d'événements vécus, et parfois l'accès à certains détails reliés à ces événements. Une étude comparative (Irish et al., 2006) a mis en évidence, chez 10 patients en stade léger à modéré de la maladie d'Alzheimer, une augmentation du score au test AMI (Autobiographical Memory Interview) accompagnée d'une baisse de l'anxiété dans une situation de remémoration musicale, par opposition à une condition « silence ». De plus, cet effet est plus marqué pour les souvenirs anciens (Foster & Valentine, 2001). L'étude de Janata (, 2009) suggère que le cortex préfrontal médial serait impliqué dans l'intégration d'extraits musicaux à des souvenirs autobiographiques. Or, cette structure semble relativement préservée dans les premiers stades de la maladie d'Alzheimer, ce qui peut expliquer pourquoi ces patients répondent positivement à la présentation de mélodies reliées à leur passé (en particulier à leur passé lointain). Par contre, dans l'étude Foster & Valentine (2001), le même effet est observé avec un environnement bruyant non musical (cafétéria ; comparativement à une troisième condition silencieuse). Les prochaines études devront donc préciser la spécificité de la musique dans cet effet et les mécanismes qui le sous-tendent (effet simple de stimulation et d'éveil, ou liens spécifiques entre musique et mémoire autobiographique).

D'autre part, de nombreuses anecdotes ont été rapportées concernant la préservation relative de la mémoire musicale dans la démence. Les études scientifiques montrent toutefois que le pattern d'altération de la mémoire musicale semble suivre le déclin mnésique global (voir Baird & Samson, 2009, pour une revue dans la maladie d'Alzheimer, ainsi que Halpern & Bartlett, 2002, pour une revue dans le vieillissement normal). La composante épisodique de la mémoire musicale est la plus rapidement altérée. La mémoire sémantique – sentiment de familiarité à l'écoute d'airs connus – serait mieux préservée dans les stades débutants et dans certains cas de stades plus avancés (voir par exemple Cuddy & Duffin, 2005). La mémoire procédurale musicale serait préservée le plus longtemps, certains musiciens étant toujours aptes à jouer de leur instrument malgré la maladie, y compris en stade avancé (par exemple, Beatty, Salmon, Butters, Heindel, & Granholm, 1988), et même à apprendre de nouvelles pièces (Cowles et al., 2003). Des études plus récentes ont montré que d'autres patients non musiciens sont également capables de reconnaître de nouveaux extraits instrumentaux entendus deux mois auparavant, ce qui n'est pas le cas pour des nouveaux extraits verbaux (histoires ou poèmes ; Samson, Dellacherie, & Platel, 2009). D'autres observations (Platelen préparation) montrent qu'ils peuvent aussi apprendre à chanter de nouvelles chansons ; dans ce cas, la mélodie semble être mémorisée plus rapidement que les paroles. Une interprétation possible de cette observation repose sur le fait que l'ancrage mnésique de la mélodie (informations perceptuelles) requiert davantage les processus de mémoire implicite, mieux préservés dans la démence.

Ces observations sur la mémoire musicale dans la démence sont pertinentes pour la question de l'utilisation mnémotechnique de la musique pour l'acquisition de nouvelles informations chez ces patients. Moussard et collaborateurs (Moussard, Bigand, Belleville, & Peretz sous presse) ont comparé l'apprentissage et le rappel de textes parlés et chantés par une personne atteinte d'un stade léger de maladie d'Alzheimer. Bien que la condition parlée était plus facilement encodée lors d'un premier apprentissage, le texte chanté a amené à de

meilleures performances dans la rétention à long terme de l'extrait. Simmons-Stern et collaborateurs (Simmons-Stern, Budson, & Ally, 2010) ont également montré une supériorité des performances de mémoire pour des chansons (versus des textes) dans une tâche de reconnaissance. Les prochains travaux devront confirmer cet effet dans de plus larges échantillons et chercher comment le maximiser d'une part, et l'adapter à la vie quotidienne et aux besoins individuels d'autre part.

4. 5. Autres Effets sur la Cognition

D'autres effets moins spécifiques, probablement davantage liés aux effets émotionnels (stimulation, éveil) et physiologiques (hormonaux par exemple) de la musique, peuvent être observés sur différents aspects de la cognition. Des thérapies d'écoute musicale ont permis, par exemple, d'améliorer les habiletés d'orientation chez des patients victimes d'amnésie après traumatisme crânien (Baker, 2001). Une étude de cas dans la maladie d'Alzheimer a montré une amélioration des performances dans une tâche spatio-temporelle après l'écoute de Mozart (comparativement à du silence, ou même à des chansons populaires des années 1930 ; Johnson, Cotman, Tasaki, & Shaw, 1998). Des effets positifs de l'écoute musicale ont également été montrés auprès de patients héminégligents, dans une étude où l'induction d'émotions positives par la musique a permis l'amélioration de l'attention visuelle : la détection de cibles dans le champ négligé était améliorée avec l'écoute des musiques préférées des patients (comparativement à non préférées ou à du silence) pendant ou avant la tâche de détection (Soto et al., 2009). Cette étude, bien que réalisée chez 3 patients seulement, montre l'importance de l'effet d'*arousal* (éveil) et de la valence émotionnelle positive pour l'amélioration des performances cognitives des patients cérébrolésés. Dans une étude contrôlée et randomisée, Särkämö et collaborateurs (, 2008) ont testé l'effet d'une écoute musicale quotidienne ajoutée à la prise en charge classique durant deux mois, chez des patients ayant subi un accident vasculaire cérébral. Cette condition était contrastée avec une écoute quotidienne d'histoires ou de poèmes récités, et à la seule prise en charge classique. La condition musicale a mené à une amélioration significative des mesures de mémoire verbale et d'attention sélective. De plus, cet effet sur la cognition s'est maintenu trois mois après la fin du protocole. D'autres études montrent un effet positif de thérapies musicales sur différents aspects du langage dans la démence, comme les fluences verbales (Van der Winckel, Feys, De Weerd, & Dom, 2004), le contenu du discours (Brotons & Koger, 2000), et les comportements de stéréotypie verbale et les palilalies (Casby & Holm, 1994). Ici, la musique n'est pas nécessairement utilisée pour ses liens spécifiques avec le langage (comme dans la technique de MIT évoquée précédemment), mais plutôt pour sa caractéristique émotionnelle, qui assure une meilleure implication dans la tâche à réaliser, un meilleur éveil psychologique et physiologique, et donc un meilleur fonctionnement cognitif global.

4. 6. Effets sur l'Humeur

Ces mêmes effets physiologiques et émotionnels peuvent être à l'origine des effets des thérapies musicales sur l'humeur. Svansdottir et Snaedal (, 2006) ont montré, chez 38 patients atteints de la Maladie d'Alzheimer en stade modéré à sévère, une réduction de l'agitation et de l'anxiété pour le groupe ayant suivi un programme de musicothérapie (comparativement à un groupe contrôle sans thérapie). L'écoute musicale diminue également l'anxiété, la confusion et la dépression dans les maladies somatiques (Cassileth, Vickers, & Magill, 2003; Siedliecki & Good, 2006) ou neurologiques (Särkämö et al., 2008). Sur le plan du

comportement, la musique est beaucoup utilisée dans les stades modérés à avancés de démences pour réduire l'agitation et les comportements agressifs, ainsi que l'apathie (Raglio et al., 2010; Svansdottir & Snaedal, 2006). Par ailleurs, les bénéfices les plus significatifs sont observés avec de la musique jouée en direct (comparativement à l'écoute de musique préenregistrée, Holmes, Knights, Dean, Hodgkinson, & Hopkins, 2006), ainsi qu'avec de la musique instrumentale (comparativement à du chant vocal seul, Cevasco & Grant, 2003). Une étude pilote (Platel, Moussard, & Francisco en préparation) a également montré que la musique permettait de faciliter l'activité de toilette chez deux patientes atteintes de la maladie d'Alzheimer en stade sévère, en institution. Pendant 2 semaines, l'activité de toilette a été accompagnée d'une chanson (décrivant les gestes de la toilette) produite vocalement par le soignant ; 4 semaines plus tard, la même procédure a été effectuée pendant 2 semaines avec une récitation du même texte (ou inversement pour la seconde patiente). Les résultats ont montré que la chanson (et non le même texte récité) était bénéfique pour les deux patientes à la fois sur le plan des capacités et de l'investissement dans l'activité (sur les mesures d'utilisation du gant, dispersion, oublis, arrêt de l'activité), et sur le plan du vécu de l'activité (sur les mesures d'anxiété, agitation, tristesse, plaintes somatiques, difficultés d'endormissement, sentiment d'échec).

4. 7. Effets sur la Sensation de Douleur et les fonctions végétatives

Les effets analgésiques de la musique mis en évidence expérimentalement chez des sujets sains peuvent être utilisés lors de traitements médicaux lourds, comme la chimiothérapie (Ferrer, 2007), la rééducation cardiaque (Mandel, Hanser, Secic, & Davis, 2007), la lombalgie chronique (Guétin, Ginies, Blayac, & Eledjam, 2005), ou lors d'interventions douloureuses (comme la biopsie, Shabanloei, Golchin, Esfahani, Dolatkhan, & Rasoulzadeh, 2010), et chez l'enfant pour différentes maladies physiques (Treurnicht-Naylor, Kingsnorth, Lamont, McKee, & Macarthur sous presse). Dans la plupart de ces études, cet effet sur la perception de la douleur est accompagné d'une baisse de l'anxiété (et/ou des indices de dépression), est probablement lié à la régulation du stress par la musique (décrite en première partie), l'anxiété et le stress étant par ailleurs des facteurs connus pour maximiser la sensation de douleur. Ces mêmes mécanismes peuvent également être utilisés pour réguler les fonctions végétatives, comme par exemple pour améliorer la qualité du sommeil (voir Lai & Good, 2005, chez des personnes âgées).

4. 8. Aspect Relationnel et Social

La musique est une activité sociale et peut être utilisée pour des interventions visant à améliorer les aspects de communication, les relations interpersonnelles, et la cohésion sociale. Par exemple, elle permet de maintenir ou rétablir un lien de communication avec les patients déments (Ogay, Platon, & Menuhin, 1996; Sambandham & Schirm, 1995). Norberg et collaborateurs (Norberg, Melin, & Asplund, 2003) ont montré que deux patients sur trois en stade final de démence ont une réaction particulière à la musique, comparativement à une stimulation tactile ou visuelle. La musique montre également des effets bénéfiques dans certains troubles psychiatriques (Wheeler, Shiflett, & Nayak, 2003), la schizophrénie et les troubles de la conscience (Goto, Noda, Ichikawa, & Fujiwarav, 2002; Talwar et al., 2006), ou l'autisme (voir Gold, Wigram, & Elefant, 2006, pour une revue). Elle permet par exemple l'amélioration de l'expression des émotions dans certaines de ces pathologies (Oyama et al., 2003). Une étude pilote chez quatre enfants autistes a évalué un programme appelé

« Auditory-motor mapping training » (Wan, Demaine, Zypse, Norton, & Schlaug, 2010). Les enfants étaient encouragés à produire vocalement des sons langagiers variant en longueur et intensité. Des images de mots, actions et situations sociales étaient également utilisées. Des instruments à percussion accompagnaient systématiquement les mots ou phrases cibles chantés par le thérapeute. La progression du programme faisait succéder les phases d'écoute passive, chant à l'unisson, chant « encouragé », répétition immédiate et enfin production seule des mots ou phrases cibles. Les quatre enfants ont démontré des progrès dans les relations sociales établies avec leurs pairs. Là aussi, plusieurs variables peuvent expliquer ces résultats, comme la stimulation du système des neurones miroirs, défaillants dans l'autisme (Hadjikhani, Joseph, Snyder, & Tager-Flusberg, 2006). Mais la musique semble surtout liée très fortement à la dimension sociale et de communication interindividuelle. Les enfants, dès l'âge de deux ans et demi, synchronisent leurs productions rythmiques musicales (percussions) de manière plus précise lorsqu'ils sont en condition sociale, c'est à dire qu'ils doivent se synchroniser avec une autre personne (comparativement à la synchronisation avec une source auditive enregistrée ou une machine à percussion automatique ; Kirschner & Tomasello, 2009) .

Dans le domaine de l'éducation ou de l'intervention psychosociale, la musique est utilisée auprès d'adolescents avec troubles du comportement (Keen, 2004) ou dans le milieu carcéral (Daveson & Edwards, 2001). Les études d'intervention psychosociales manquent généralement de mesures objectives (quantification des résultats, groupes contrôles). Cependant, les rapports émis dans ce champ d'intervention suggèrent encore que cette dimension sociale de la musique est cruciale. L'écoute et la pratique musicale pourraient contribuer au développement de l'empathie en facilitant le décodage des intentions expressives des interlocuteurs et en améliorant la capacité de production de patterns intonatifs des locuteurs (Aziz-Zadeh, Sheng, & Gheytanchi, 2010). D'autres études suggèrent que la capacité à reconnaître les émotions dans les pièces musicales est une excellente mesure de l'intelligence émotionnelle (Resnicow, Salovey, & Repp, 2004). La musique est donc un vecteur de communication unique qui permet de rétablir un lien chez des personnes souvent isolées ou en difficulté relationnelle.

4. 9. Résumé

Les études qui ont testé le potentiel de la musique comme instrument de thérapie sont nombreuses. Deux grands types d'intervention peuvent être distingués. D'un côté, les approches de type musicothérapie utilisent principalement la musique pour ses effets généraux sur l'humeur, le comportement, la communication, et ont pour objectif d'améliorer le bien-être des patients, ou leur état général d'éveil – et donc parfois indirectement leur fonctionnement cognitif global. Ces approches sont essentielles, en particulier dans un contexte où la musique est parfois un des seuls moyens pour établir un contact avec les patients, comme dans des cas de démence avancée ou dans les troubles envahissants du développement. Bien que non systématiquement mesuré, il est probable que l'effet de la musique dans ce contexte soit dû à son influence sur le système émotionnel et neurophysiologique, régulant l'état psychologique et cognitif entre stimulation et apaisement.

D'un autre côté, certaines approches plus ancrées dans un cadre théorique neuroscientifique et cognitif visent à exploiter les liens spécifiques entre la musique et une fonction altérée ciblée. En plus de l'effet potentiel d'éveil / apaisement cité ci-dessus, la richesse de la composition du stimulus musical, et la distribution de son traitement – impliquant des liens avec d'autres fonctions mentales – lui confèrent un statut privilégié pour la remédiation de différentes pathologies focalisées (pour plus de lectures, voir par exemple

la revue de Koelsch, 2009, les livres édités par Hallam, Cross, & Thaut, 2009 (partie 10), ou Dalla Bella et al., 2009 (partie 6), ou, dans le domaine du vieillissement normal et pathologique, le numéro spécial à venir de la revue *Music Perception*, intitulé « Music, aging and dementia » édité par L. Cuddy, A. Halpern et I. Peretz).

La spécificité de la musique peut être questionnée dans ces deux cas de figure. Par exemple, l'effet de stimulation et d'éveil peut être retrouvé – et montrer des effets similaires sur la cognition – avec des récits (voir l'étude de Nantais & Schellenberg, 1999, utilisant des livres de Stephen King dans cette optique). L'effet plus spécifique de la musique sur une fonction cible peut également être dû à une composante qui se retrouverait dans d'autres matériels que la musique. Par exemple, dans la stimulation de la motricité, l'utilisation du métronome suffit pour l'observation de progrès de la marche chez les patients Parkinsoniens ; l'essentiel de cette stratégie réside donc dans la mise en place d'un rythme auditif, et pas nécessairement musical. De la même manière, dans un autre registre, d'autres types d'activités pourraient favoriser la communication sociale et interindividuelle (par exemple, la pratique du sport). Il se trouve néanmoins que la musique est l'une des stimulations qui incarne le mieux l'expression rythmique auditive, et est l'une des activités les mieux représentatives de la vie en société et du partage interindividuel. Si les mêmes effets peuvent être observés avec d'autres matériels présentant chacun des caractéristiques communes avec la musique, celle-ci reste la mieux placée pour combiner un grand nombre d'avantages démontrés comme utiles dans diverses situations de stimulation ou thérapie.

5. Conclusion Générale et Perspectives

La musique est un stimulus riche sur le plan acoustique qui permet de développer des architectures sonores sophistiquées, s'étendant sur des empires temporels qui peuvent être de l'ordre d'un discours. Pendant de nombreuses années, les travaux en sciences cognitives sur la musique se sont focalisés sur les processus de traitement de ces stimuli. La possibilité de manipuler les aspects de l'organisation musicale à de multiples niveaux constituait une opportunité de mieux comprendre le fonctionnement de la cognition auditive (McAdams & Bigand, 1994, pour revue). Dans les 20 dernières années, les recherches en neurosciences cognitives de la musique se sont orientées vers les effets des stimuli musicaux sur le sujet. Ces études ont mis en évidence l'importante réactivité du cerveau à la musique, notamment sur le plan émotionnel (et système de récompense), et via des modifications significatives des sécrétions hormonales. La musique est également apparue comme un vecteur de plasticité cérébrale anatomique et fonctionnelle chez les musiciens, puis, dans les travaux les plus récents, chez des enfants et des adultes qui débutent une activité musicale.

Un grand groupe d'études a montré que le traitement de la musique fait intervenir des processus généraux dans les registres perceptif, cognitif, émotionnel et moteur, et peut également partager des ressources neuronales avec des domaines de traitement spécifiques (le langage, par exemple). Étant donné qu'il n'existe pas de centre cérébral spécifiquement dédié au traitement de la musique, celle-ci stimule – et modifie – de nombreuses régions corticales et sous corticales dans les deux hémisphères cérébraux, y compris dans des régions cérébrales archaïques et peu enclines à la plasticité, telles que le tronc cérébral. La musique engage donc le sujet dans une expérience relativement unique d'intégration de ces fonctions et de synchronisation des réseaux neuronaux qui y sont associées. La pratique et l'écoute musicales soutenues peuvent avoir des conséquences bénéfiques sur des compétences non musicales, d'ordre perceptif, cognitif (mémoire et langage notamment), émotionnel et social (empathie) et moteur. La musique est donc potentiellement une « technologie transformationnelle » qui

peut modifier le fonctionnement psychologique dans ses différentes dimensions, ainsi que les structures neuronales qui portent ce fonctionnement.

Cette « symphonie cérébrale » semble présenter des avantages précieux pour des applications thérapeutiques non médicamenteuses en réhabilitation. Les activations multiples liées à la musique rendent les activités musicales plus résistantes aux atteintes cérébrales et psychologiques (Sacks, 2007), et permettent de recourir à ces activités pour relancer certaines compétences cognitives moins résistantes. Bien qu'encore très jeune et parfois lacunaire sur le plan méthodologique, la recherche actuelle, dont nous avons montré les résultats principaux dans la dernière section de cet article, souligne que les effets positifs de la musique dépassent les simples effets motivationnels ou de régulation de l'humeur, bien documentés par la musicothérapie traditionnelle. L'utilité de la musique pour la remédiation spécifique du langage, de la motricité, ou des stratégies mnésiques commence à être bien établie, tant sur le plan comportemental que neurophysiologique. Ces stratégies de thérapies « neuro-musicales » sont d'autant plus prometteuses qu'elles sont non invasives, peu coûteuses, donc faciles à mettre en place en clinique, et accessibles à tous, y compris sans formation musicale préalable. Les études sur ces thérapies sont de plus en plus nombreuses, de mieux en mieux contrôlées et axées sur l'explicitation des mécanismes sous-jacents, et de plus en plus souvent élaborées dans une démarche interdisciplinaire soutenue par des innovations technologiques pertinentes. On peut donc s'attendre à observer une évolution des stratégies d'intervention via la musique dans les années à venir.

D'importants enjeux existent notamment pour la prévention des pathologies du vieillissement. L'écoute, et plus encore la pratique de la musique pourrait constituer un excellent moyen d'entretenir et de renforcer les compétences cognitives, motrices, émotionnelles et sociales des seniors et de retarder ainsi les effets du vieillissement. Les travaux sur l'impact de la musique sur le vieillissement cognitif sont encore peu nombreux, mais leurs résultats sont prometteurs. De manière anecdotique, Grant et Brody (, 2004) ont observé, dans une population de 23 musiciens âgés appartenant au même orchestre, qu'aucun d'entre eux ne semblait atteint de démence. En se basant sur la prévalence statistique de la population démographique correspondante, huit ou neuf de ces personnes « auraient dues » être atteintes de la maladie d'Alzheimer. Des programmes d'activités musicales (chant, écoute et appréciation musicale) ont également entraîné une amélioration de la qualité de vie des personnes âgées (Solé, Mercadal-Brotons, Gallego, & Riera, 2010; Wise, Hartmann, & Fisher, 1992), mais ces études manquent de groupe contrôle pour attester de la spécificité de l'entraînement musical dans cet effet. Une autre étude (Bugos, Perlstein, McCrae, Brophy, & Bedenbaugh, 2007) a montré que des leçons de piano hebdomadaires données à des personnes âgées non musiciennes de 60 à 85 ans pendant six mois (avec pratique encouragée entre les séances) ont amélioré leurs performances dans des tests de mémoire de travail et de vitesse de traitement, comparativement à un groupe contrôle qui n'a pas suivi d'entraînement. Bien que l'étude soit randomisée, il est difficile à nouveau de conclure de la spécificité de la musique dans cet entraînement en raison de l'inactivité du groupe contrôle.

La pratique musicale préserverait-elle de la démence ? Ces données sont à confirmer dans des échantillons plus larges et mieux contrôlés, mais elles sont pour autant intrigantes et plausibles à la fois. Cet effet pourrait s'expliquer d'une part par la stimulation générale des fonctions mentales par la musique. Mais aussi, les effets physiologiques et hormonaux provoqués par la musique pourraient jouer un rôle important dans la préservation de la cognition : des résultats positifs ont été observés chez des patients atteints de stade léger de maladie d'Alzheimer en réaction à des traitements médicamenteux hormonaux. Il serait donc intéressant d'obtenir des effets similaires avec une méthode non invasive (Fukui & Toyoshima, 2008). Nous avons vu d'autre part que la musique est aussi un vecteur important de plasticité cérébrale. Or il a été montré que des phénomènes de plasticité cérébrale et

mécanismes compensatoires étaient mis en place dans le vieillissement normal (Cabeza, 2002; Logan, Sanders, Snyder, Morris, & Buckner, 2002), et déterminants pour retarder l'expression clinique des dysfonctionnements neurobiologiques de la démence (par exemple, Peters et al., 2009). De plus, il a été montré récemment que ces phénomènes de plasticité peuvent être modulés par l'entraînement cognitif, y compris en stade pré-clinique de démence (*Trouble Cognitif Léger* ; Belleville et al., 2011). Puisque la musique induit une importante réactivité du cerveau et des phénomènes de plasticité (qui peuvent s'observer même à court terme), et fait appel à de nombreuses compétences mentales, elle représente un matériel privilégié pour penser des interventions de stimulation dans le vieillissement normal et pathologique.

6. Remerciements

Ce travail a été supporté par une bourse de recherche du réseau canadien Auditory Cognitive Neurosciences (ACN-Create) attribuée à Aline Moussard. Nous remercions également le programme ANR Blanc (*Does Music boost the Brain ?*), ainsi que le programme européen EBRAMUS. Nous souhaitons enfin remercier chaleureusement Anna Zumbansen pour ses relectures éclairées du manuscrit.

DISCUSSION GÉNÉRALE

Ce travail de thèse avait pour premier objectif d'évaluer les effets de deux méthodes d'entraînement auditif chez les enfants sourds profonds (méthode le « Son en Mains » et entraînement musical) ainsi que leurs effets de transfert vers des tâches non entraînées.

La première étude (articles 1 à 4) portait sur 1) les effets de la méthode « le Son en Mains » et posait la question des indications d'un tel entraînement compte-tenu de l'hétérogénéité des caractéristiques cliniques des enfants et 2) les effets de transfert vers des tâches non entraînées. Conformément à nos hypothèses, les résultats indiquent que l'entraînement bénéficie à l'ensemble des enfants, c'est-à-dire que l'ensemble des enfants a démontré une augmentation de leurs performances dans les tâches entraînées, quel que soit leur statut langagier (langue des signes ou langue orale), leur statut prothétique (prothèse auditive ou implant cochléaire) leur âge ou encore leur âge d'implantation. La seconde question était relative aux effets de transfert vers des tâches non entraînées. L'ensemble des enfants a également manifesté une augmentation dans leurs scores de perception phonétique et dans le contrôle de leur voix ainsi qu'une amélioration dans la production de leur parole.

La deuxième étude (article 5) avait pour premier objectif d'évaluer les effets de l'entraînement musical, en comparant les performances d'enfants entraînés à celles d'enfants non entraînés avec la musique. Un clair effet de l'entraînement musical a été mis en évidence sur les scores obtenus dans chacune des tâches auditives de notre batterie de tests, en particulier en mémoire auditive (pourcentage de bonnes réponses et empan) ainsi qu'en discrimination phonétique). Le second objectif de cette étude concernait l'évaluation des pertinences respectives de chacune de ces deux approches que sont le « Son en Mains » et l'entraînement musical. L'étude des scores ne permet pas vraiment d'opposer chacune des deux méthodes mais leurs effets se remarquent sensiblement sur les mêmes mesures.

Le deuxième but de cette thèse était de caractériser des effets connexes de l'apprentissage musical. La troisième étude (article 6 et 7) visait à explorer les compétences des enfants entraînés avec de la musique dans d'autres domaines comme la perception des émotions musicales et l'apprentissage implicite comparativement à des enfants normo-entendants (non entraînés musicalement). Les résultats montrent que la surdité affecte la capacité de traitement des émotions musicales et/ou de reconnaissance des émotions musicales mais celle-ci demeure suffisante pour que les enfants sourds répondent globalement au dessus du hasard aux quatre catégories d'émotions. Ils présentent en revanche des capacités d'apprentissage implicite comparables à celles des enfants normo-entendants.

L'ensemble de ces résultats sont discutés ci-dessous à la lumière de la littérature existante en neuropsychologie et en psychologie cognitive de la perception auditive.

La déprivation sensorielle précoce a de nombreuses conséquences chez les enfants sourds. Il est bien établi que l'absence d'informations sonores précoces, et surtout prolongées, produit un retard de la maturation neuronale affectant en particulier la synaptogenèse des voies auditives centrales et la croissance axonale (Kral & Eggermont, 2007; Sharma et al., 2002; Gilley et al., 2008). La privation prolongée d'informations acoustiques, même si elle est rarement totale, oriente le développement de l'attention, qui se manifeste par une plus grande habileté dans le traitement des signaux visuels ainsi qu'une plus grande sensibilité tactile (Levänen et al., 1998). L'enfant « apprend » que les autres canaux sensoriels sont porteurs d'informations plus pertinentes que les restes auditifs dont il dispose. Mais surtout, il maintient ce fonctionnement même après correction auditive. Ce phénomène conduit à une compensation inter-modalitaire du traitement des informations, particulièrement au niveau des aires auditives secondaires qui sont activées par des stimuli visuels. Parallèlement plusieurs études ont mis en évidence que ce phénomène influence négativement les mécanismes de traitement auditif mais aussi entraîne des effets délétères

dans le développement de certaines opérations cognitives, comme la mémoire de travail et le traitement séquentiel des événements auditifs. Nous avons également vu que le seul traitement actuellement disponible repose sur la restauration de la transmission sonore, par implant cochléaire ou prothèse auditive qui produisent un signal réduit acoustiquement par rapport au signal naturel. Dans ce contexte, la rééducation des enfants constitue un enjeu majeur pour permettre aux enfants de tirer parti des informations sonores qui leur parviennent. Elle doit déterminer des stratégies d'intervention qui mettent en jeu et combinent des moyens qui suscitent puis développent l'attention et le traitement auditif des enfants. C'est de la pertinence de ces stratégies que se produiront des connexions cérébrales efficaces soutenant le développement des processus cognitifs affectés par la surdité.

Dès lors, comment comprendre l'augmentation des performances auditives dans les tâches entraînées et non entraînées chez les enfants entraînés avec le « Son en Mains » et chez les enfants assignés à des leçons de musique comparativement aux enfants contrôles ?

De nombreux travaux ont mis en évidence des phénomènes de plasticité cérébrale liés à l'expertise auditive chez les musiciens. Non seulement les structures auditives centrales sont anatomiquement et fonctionnellement plus développées que chez les non-musiciens (Jäncke et al., 1997; Pantev, Oostenveld, Engelien, Bernhard et al., 1998; Pantev et al., 2001; Pantev et al., 2003; Schneider et al., 2002; Schneider et al., 2005) mais également ce développement affecte l'ensemble des structures cérébrales soutenant la pratique instrumentale (motrices, pré-motrices, somatosensorielles, ainsi que les circuits de l'attention). Ces structures neuronales seraient optimisées d'un côté par un plus grand nombre de neurones impliqués dans la réalisation des tâches, mais leur synchronisation temporelle serait renforcée. Les connexions synaptiques excitatrices et inhibitrices seraient également plus efficaces. Des modifications de réponses neuronales ont aussi été obtenues après de courtes périodes d'exposition auditive (Ozaki et al., 2004; Pantev, Wollbrink, Roberts, & Engelien, 1999).

Des phénomènes de plasticité plus forts sont remarqués lorsque cette expérience auditive est accompagnée d'une composante motrice. Les liens entre motricité et audition sont présents dès la naissance. La perception d'un stimulus sonore déclenche une réponse motrice réflexe d'orientation du regard ou orientation de la tête vers la source, les cortex auditifs et moteurs étant reliés par des systèmes de projections réciproques. Leur maturation est soumise à l'expérience. Chez la population experte que constituent les musiciens, les cortex moteurs sont activés par l'écoute de pièces musicales connues (Haueisen & Knösche, 2001). L'utilisation d'un clavier muet produit des activations des aires auditives primaires et secondaires (Bangert et al., 2006). L'apprentissage de la musique produit également chez les enfants des modifications de réponses neuronales (Fujioka et al., 2006; Magne et al., 2006) accompagnées de transfert vers des compétences langagières (Moreno et al., 2009). Chez les non-musiciens, un entraînement musical avec composante sensorimotrice (pratique) de courte durée (10 sessions) produit davantage de modifications des représentations auditives (augmentation de la MMN) qu'un entraînement centré sur l'écoute. (Lappe et al., 2008). Les aires motrices s'activent chez les non-musiciens qui écoutent un air qu'ils ont été entraînés à jouer mais pas pour d'autres mélodies (Lahav et al., 2007). Cette composante (feedback auditif) a d'ailleurs été utilisée dans la rééducation motrice (Altenmüller, Marco-Pallares, Münte, & Schneider, 2009; Schneider, Schönte, Altenmüller, & Münte, 2007; McIntosh, Brown, Rice, & Thaut, 1997) et langagière (Racette et al., 2006). Ces modifications s'accompagnent d'une supériorité des compétences qui impliquent ces structures (Ho et al., 2003; Jäncke, 2009; Oeschlin et al., 2010), suggérant donc que ces effets de transfert reposeraient au moins sur ce constat de réseaux neuronaux communs. La pratique musicale, en résumé, constitue une tâche complexe qui met en jeu de nombreuses composantes, et

donc, active simultanément de nombreuses aires cérébrales. Ces données, dans le cadre de notre thèse, nous amènent à considérer la contribution de la composante motrice ainsi que l'importance de la nature des tâches.

Cette dimension motrice constitue également une composante importante des programmes d'entraînements perceptifs que nous avons testés. Dans l'entraînement avec « le Son en Mains », où l'émission sonore est entièrement tributaire du geste de l'enfant, l'utilisation de la composante motrice a un double objectif : dans un premier temps, la préparation motrice favorise l'orientation du focus attentionnel sur la production du son (attention endogène). Dans un deuxième temps, par son action, l'enfant peut exercer un contrôle de sa réponse. Il peut vérifier son hypothèse de réponse par la ré-émission de sources sonores, permettant le renforcement de l'utilisation de mécanismes top-down par une spécificité du focus, par exemple, vers des composantes ambiguës pour l'enfant du stimulus auditif ou encore pour rafraîchir le contenu de la mémoire de travail. De même, dans l'entraînement musical, la composante motrice est sans cesse sollicitée. Cet engagement moteur, par l'activation du réseau perceptivo-moteur permettrait de développer le traitement polysensoriel de l'information sonore et une intégration structurelle plus profonde.

L'objectif d'un entraînement dépasse la simple augmentation des performances dans les tâches entraînées mais doit ouvrir à des possibilités de généralisation et/ou de production d'effets de transfert vers d'autres compétences perceptives et/ou cognitives. Cette possibilité de transfert est un des enjeux les plus débattus dans le domaine de la stimulation cognitive. Si plusieurs tâches requérant l'activation de zones variées de l'encéphale sont regroupées dans un même programme d'entraînement, les probabilités de transfert augmentent (Schmiedek, Lövdén, & Lindenberger, 2010). La neuroimagerie a permis de mettre en évidence que la nature de la tâche, et en particulier le type de traitement qu'elle requiert active différemment les aires cérébrales. Par exemple, la simple perception de sons de l'environnement produit des activations temporelles dans l'hémisphère droit. Mais lorsqu'un traitement sémantique est demandé, l'hémisphère gauche est engagé (Matsumiya, Tagliasco, Lombroso, & Goodglass, 1972). Nous avons vu (Chapitre 5) que dans les méthodes de rééducation traditionnelles, l'accent est mis sur la perception de contrastes acoustiques dans un premier temps avec du matériel sonore diversifié (sons de l'environnement, son musicaux). Par la suite, la perception des paramètres acoustiques isolés est entraînée (différence de hauteur, de durée etc...) précédant celle des sons de la parole vocaliques et consonantiques, isolément, puis inclus dans des syllabes et des mots. Ces tâches requièrent une activation temporelle bilatérale, notamment dans la région du planum temporelle gauche (Jäncke, Wüntenberg, Scheich, & Heinze, 2002) mais favorisent guère une association entre la perception auditive et sa valeur sémantique, donc dans la construction de représentations.

Le programme d'entraînement le « Son en Mains » réunit quatre types de tâches déclinées avec quatre types de sons combinés selon une progression de difficulté croissante. Les associations sémantiques sont assurées par l'utilisation d'images ou de figurines représentant les sources sonores utilisées. Dans cette approche, les sons ne sont pas utilisés pour leurs caractéristiques acoustiques, leur grande diversité a pour objectif de fournir aux différentes aires cérébrales activées en fonction des tâches, de la « matière sonore » à traiter. Le « Son en Mains » peut être considéré comme un entraînement à effectuer toutes les opérations cognitives du traitement auditif sans « spécialisation » psychoacoustique particulière, et donc un moyen de solliciter non seulement les aires auditives mais également d'autres réseaux neuronaux auxquels elles sont reliées, comme les aires prémotrices, les aires motrices et les aires somatosensorielles. Cette approche expliquerait l'augmentation des performances auditives constatées après entraînement, comparativement au groupe non entraîné, non seulement dans les tâches entraînées mais aussi dans les tâches pour lesquelles

les enfants n'ont reçu aucune stimulation additionnelle (discrimination phonétique). Dans cette hypothèse interprétative, l'augmentation des représentations phonétiques et de leurs formes acoustiques faciliterait l'étape de planification articulatoire (mécanisme feed-forward) ainsi que les mécanismes de contrôle (feed-back auditif) à l'œuvre dans la production de la parole. La meilleure efficacité de ces deux mécanismes permettrait à la fois une réduction du poids des informations kinesthésiques et proprioceptives dans l'étape de planification motrice de la production de la parole, d'où une diminution de la fréquence fondamentale et une augmentation du débit de la parole par une diminution du temps moyen par phonème.

Un facteur additionnel de plasticité serait l'implication des réseaux émotionnels et de motivation. Les mécanismes émotionnels produisent des réactions physiologiques qui ont été explorés dans le cadre de l'écoute de la musique. Ainsi, une musique dynamisante et plaisante peut entraîner une libération de dopamine (Salimpoor et al., 2011) sous l'effet du plaisir ressenti, voire favoriserait la plasticité cérébrale par le jeu de sécrétions hormonales (Fukui & Toyoshima, 2008). De plus, le plaisir agit sur le degré d'*arousal* qui permettrait, par effet de cascade, des traitements cognitifs plus efficaces (Schellenberg & Hallam, 2005). La motivation et le ressenti émotionnel des enfants entraînés avec le « Son en Mains » avaient été évalués à l'aide d'un questionnaire qui mettait en évidence un fort degré de plaisir manifesté par les enfants. Cette composante peut également être avancée chez les enfants qui reçoivent des leçons de musique et qui manifestent beaucoup d'enthousiasme.

Une étude neurophysiologique des effets de la méthode « Son en Mains » permettrait de compléter les données comportementales recueillies pour notre thèse. Notre interprétation permettrait notamment de prédire une plus grande connectivité entre les aires auditives et motrices après entraînement. Cette hypothèse pourrait être mise en évidence par des méthodes EEG ou la NIRS qui sont compatibles avec les différents types d'appareillage.

Les différences des scores des enfants entraînés auditivement à l'aide de nos deux méthodes, comparés à ceux qui reçoivent une éducation auditive traditionnelle, dans les différences mesures de perception auditive que nous avons réalisées, pourrait relever de la nature des tâches employées et des sphères cognitives sollicitées. De ce point de vue, nous pouvons considérer que les enfants sourds qui ont servi de contrôles dans nos études sont stimulés par des tâches (et des stimuli) spécifiquement langagiers. Cette approche a pour objectif de stimuler une compétence très spécialisée, voire modulaire (Fodor, 1986), qui ne permet guère de transfert vers d'autres compétences. Ce constat serait d'ailleurs confirmé par l'absence de généralisation remarquée chez des adultes sourds postlinguaux implantés qui ont été entraînés à une tâche spécifique de discrimination de fréquences Fitzgerald & Wright, 2005).

Selon une conception hiérarchique des fonctions cognitives (Carroll, 1993), l'entraînement des processus généraux soutenant des fonctions (ou opérations) cognitives spécifiques permettrait une augmentation des performances qui pourraient se généraliser à d'autres activités cognitives. Or, la surdité affecte le développement de différents processus généraux de la cognition. Par exemple, le traitement et l'apprentissage du langage sont affectés à des degrés variés, les scores de mémoire de travail des enfants sourds sont inférieurs à ceux des enfants normo-entendants de même âge. Leurs capacités d'inhibition et de flexibilité mentale sont réduites. De plus, la surdité affecterait les processus d'apprentissage implicite, cependant fondamentaux pour extraire les régularités de l'environnement et acquérir des règles complexes (Conway et al., 2011). Les processus généraux de la perception auditive seraient également affectés par la surdité (ou les limites des appareillages), qui limitent par exemple les processus de groupement et de ségrégation des flux auditifs et en aval la formation puis la mémorisation de représentations auditives.

Des études ont montré que l'apprentissage de la musique produit des effets positifs sur les processus cognitifs généraux comme de la mémoire verbale (Ho et al., 2003 ; Chan et al., 1998). Schellenberg et collaborateurs (Schellenberg, 2006) ont mis en évidence dans une vaste étude les effets de leçons de musique sur l'augmentation du QI, qui n'était pas limitée à des subtests particuliers de l'intelligence mais revêtait au contraire un caractère général. A cette augmentation du QI, était associée de bons résultats scolaires. D'autres auteurs vont même plus loin et soutiennent l'hypothèse de fondements biologiques de la musique (Trehub & Hannon, 2006), prenant en considération la sophistication des traitements auditifs manifestés par les bébés, les connaissances de règles musicales complexes démontrées par des non-musiciens (Tillmann, Bharucha, & Bigand, 2000) ainsi que l'universalité de comportements musicaux utilisés par les mères du monde dans leur communication avec leur bébé (Trehub & Trainor, 1998). L'étude des doubles dissociations (préservation de capacités de traitement musical mais traitement langagier altéré ou l'inverse) suggère cependant que des systèmes de traitement distincts seraient à l'œuvre (Peretz & Coltheart, 2003). Dans cette perspective, il paraît difficile de comprendre comment les enfants entraînés avec les deux méthodes d'entraînement que nous avons testés, et donc sans matériel langagier, présentent des scores de perception phonétique significativement supérieurs à ceux qui sont entraînés avec les méthodes traditionnelles. Une interprétation possible des effets des stimulations musicales sur les compétences linguistiques consiste à invoquer les recouvrements neuronaux existants entre les zones cérébrales impliquées dans le traitement de la musique et du langage (voir Patel, 2008 pour une revue). Cette question est aujourd'hui au cœur des débats en neurosciences cognitives de la musique. Nous pouvons également avancer une interprétation plus parcimonieuse de nos résultats consistant à considérer que la musique stimule des mécanismes généraux de traitement des informations sonores et soutiendrait le développement d'habiletés plus spécifiques, comme celles des traits phonologiques.

Dans cette perspective, puisque la musique contribuerait au développement des processus cognitifs généraux (Schellenberg, 2006), elle permettrait aux enfants sourds de développer leurs capacités d'apprentissage implicite dont le déficit a été mis en évidence par Conway et collaborateurs. En aval, elle permettrait aussi aux enfants de développer l'extraction de régularités perceptives fondamentales pour le développement langagier, non seulement au niveau phonétique mais aussi à des niveaux supérieurs comme le traitement syntaxique. Cette hypothèse devrait toutefois être vérifiée par des expériences ultérieures chez des enfants non entraînés par la musique. Si un déficit est révélé dans cette population, nous pourrions alors mettre clairement en évidence l'effet bénéfique des stimulations des processus cognitifs généraux.

Implications cliniques

L'ensemble de ces résultats et leur lecture nous conduit donc à reconsidérer la façon de concevoir l'éducation auditive chez les enfants sourds, selon deux axes. Il conviendrait tout d'abord d'accorder plus d'importance à la stimulation des mécanismes généraux d'apprentissage qui permettrait à la fois des effets de généralisation et de transfert. Ensuite, nous suggérons le contrôler la difficulté des tâches afin de stimuler un plus grand nombre de structures cérébrales. L'apprentissage de la musique nous paraît à cet égard un moyen très complet qui permet également, par ses effets émotionnels et motivationnels de maintenir l'intérêt des enfants pour le matériel auditif. Cette approche pourrait avoir des conséquences économiques en terme de temps de rééducation (réduction du temps de rééducation) mais également des effets de plasticité neuro-cognitive à long terme plus stables.

Ces résultats nous conduisent également à féliciter les démarches visant à systématiser le dépistage néo-natal de l'audition. En février 2010, la Haute Autorité de Santé a renouvelé ses recommandations de 2007 en faveur d'un dépistage systématique de la surdité bilatérale permanente au niveau national. En novembre 2010, une proposition de loi (n°2752) visant à généraliser le dépistage systématique de la surdité en maternité a été étudiée par la Commission des Affaires Sociales à l'Assemblée Nationale qui a émis un avis favorable puis déposée au Sénat en décembre 2010. Le 7 juillet 2011, l'Assemblée Nationale a adopté la proposition de loi sur le dépistage précoce des troubles de l'audition. Enfin en avril dernier, paraît au Journal Officiel un arrêté ministériel définissant les modalités pratiques de la réalisation de la proposition aux parents d'un dépistage de l'audition de leur nourrisson. Ces décisions constituent une remarquable avancée pour la prise en charge des enfants sourds profonds. Elles permettront un traitement prothétique plus précoce, favorisant la maturation cérébrale dans le respect des périodes critiques du développement sous l'effet d'entraînements auditifs efficaces.

BIBLIOGRAPHIE

- Abdi, S., Khalessi, M. H., Khorsandi, M., & Gholami, B. (2001). Introducing music as a means of habilitation for children with cochlear implants. *International Journal of Pediatric Otorhinolaryngology*, 59(2), 105-113.
- Altenmüller, E. O. (2001). How many music centers are in the brain? *Annals New York Academy of Science*, 930, 273-280.
- Altenmüller, E. O., Marco-Pallares, J., Münte, T. F., & Schneider, S. (2009). Neural reorganization underlies improvement in stroke-induced motor dysfunction by music-supported therapy. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1169, 395-405.
- Amunts, K., Schlaug, G., Jäncke, L., Steinmetz, H., Schleicher, A., Dabringhaus, A., et al. (1997). Motor cortex and hand motor skills: Structural compliance in the human brain. *Human Brain Mapping*, 5(3), 206-215.
- Anvari, S. H., Trainor, L. J., Woodside, J., & Levy, B. A. (2002). Relations among musical skills, phonological processing, and early reading ability in preschool children. *Journal of Experimental Child Psychology*, 83(2), 111-130.
- Aziz-Zadeh, L., Sheng, T., & Gheytanchi, A. (2010). Common premotor regions for the perception and production of prosody and correlations with empathy and prosodic ability. *PLoS One*, 5(1), e8759.
- Baddeley, A. (1993). *La mémoire humaine, théorie et pratique*. Grenoble: PUG.
- Baddeley, A. (1992). Working Memory. *Science*, 255(5044), 556-559.
- Baddeley, A., Thomson, N., & Buchanan, M. (1975). Word length and the structure of short-term memory. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, 14, 575-589.
- Baird, A., & Samson, S. (2009). Memory for music in Alzheimer's disease: Unforgettable? *Neuropsychology Review*, 19(1), 85-101.
- Baker, F. (2001). The effects of live, taped, and no music on people experiencing posttraumatic amnesia. *Journal of Music Therapy*, 38(3), 170-192.
- Balkwill, L.-L., & Thomson, W. F. (1999). A Cross-Cultural Investigation of the Perception of Emotion in Music: Psychophysical and Cultural Cues. *Music Perception*, 17(1), 43-64.
- Bangert, M., Peschel, T., Schlaug, G., Rotte, M., Drescher, D., Hinrichs, H., et al. (2006). Shared networks for auditory and motor processing in professional pianists : Evidence from fMRI conjunction. *Neuroimage*, 30, 917-926.
- Baudonck, N., Dhooge, I., & Van Lierde, K. (2010). Intelligibility of hearing impaired children as judged by their parents: A comparison between children using cochlear implants and children using hearing aids. *International Journal of Pediatric Otorhinolaryngology*, 74(11), 1310-1315.

- Baudonck, N., Van Lierde, K., Dhooge, I., & Corthals, P. (2011). A Comparison of Vowel Productions in Prelingually Deaf Children Using Cochlear Implants, Severe Hearing-Impaired Children Using Conventional Hearing Aids and Normal-Hearing Children. *Folia Phoniatrica & Logopaedica*, 63(3), 154-160.
- Bauer, J. J., Mittal, J., Larson, C. R., & Hain, T. C. (2006). Vocal responses to unanticipated perturbations in voice loudness feedback: an automatic mechanism for stabilizing voice amplitude. *Journal of Acoustical Society of America*, 119(4), 2363-2371.
- Bavelier, D., Newman, A. J., Mukherjee, M., Hauser, P. C., Kemeny, S., Braun, A., et al. (2008). Encoding, Rehearsal and Recall in Signers and Speakers: Shared Network but Differential Engagement. *Cerebral cortex*, 18(10), 2263-2274.
- Beatty, W. W., Salmon, D. P., Butters, N., Heindel, W. C., & Granholm, E. L. (1988). Retrograde amnesia in patients with Alzheimer's disease or Huntington's disease. *Neurobiology of Aging*, 9(2), 181-186.
- Belin, P., Zatorre, R., & Ahad, P. (2002). Human temporal-lobe response to vocal sounds. *Cognitive Brain Research*, 13, 17-26.
- Belleville, S., Clément, F., Mellah, S., Gilbert, B., Fontaine, F., & Gauthier, S. (2011). Training-related brain plasticity in subjects at risk of developing Alzheimer's disease. *Brain*.
- Bellugi, U., & Fischer, S. (1972). A comparison of sign language and spoken language: Rate and grammatical mechanisms. *Cognition*, 1(2-3), 173-200.
- Bergelson, E., & Swingle, D. (2012). At 6-9 months, human infants know the meanings of many common nouns. *PNAS*, 109(9), 3253-3258.
- Bernardi, L., Porta, C., & Sleight, P. (2006). Cardiovascular, cerebrovascular, and respiratory changes induced by different types of music in musicians and non musicians : The importance of silence. *Heart*, 92, 445-452.
- Besson, M., Chobert, J., & Marie, C. (2011). Transfer of training between music and speech: Common processing, attention, and memory. *Frontiers in Psychology*, 2, 1-12.
- Besson, M., Schön, D., Moreno, S., Santos, A., & Magne, C. (2007). Influence of musical expertise and musical training on pitch processing in music and language. *Restorative Neurology and Neuroscience*, 25(3-4), 399-410.
- Bidelman, G. M., Krishnan, A., & Gandour, J. T. (2011). Enhanced brainstem encoding predicts musicians' perceptual advantages with pitch. *The European Journal of Neuroscience*, 33(3), 530-538.
- Bigand, E. (2009). L'émotion dans le langage musical. In S. Dehaene & C. Petit (Eds.), *Parole et Musique. Aux origines du dialogue humain* (Odile Jacob ed.). Paris: Collège de France.
- Bigand, E., Delbé, C., Gérard, Y., & Tillmann, B. (2011). Categorization of Extremely Brief Auditory Stimuli: Domain-specific or Domain-general Processes? *Plos One*, 6(10), e27024 doi:27010.21371/journal.pone.0027024.

- Bigand, E., Filipic, S., & Lalitte, P. (2005). The time course of emotional responses to music. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1060(429-437).
- Bigand, E., & Poulin-Charronnat, B. (2006). Are we "experienced listeners"? A review of the musical capacities that do not depend on formal musical training. *Cognition*, 100(1), 100-130.
- Bilhartz, T. D., Bruhn, R. A., & Olson, J. E. (2000). The effect of early music training on child cognitive development. *Journal of Applied Developmental Psychology*, 20(4), 615-636.
- Binder, J. R., Frost, F. A., Hammeke, T. A., Bellgowan, P. S., Springer, J. A., Kaufman, J. N., et al. (2000). Human temporal lobe activation by speech and non speech sounds. *Cerebral cortex*, 10(5), 512-528.
- Blamey, P. J., Sarant, J. Z., Paatsch, L. E., Barry, J. J., Bow, C. P., Wales, R. J., et al. (2001). Relationships Among Speech Perception, Production, Language, Hearing Loss, and Age in Children With Impaired Hearing. *Journal of Speech Language Hear Research*, 44(2), 264-285.
- Blood, A. J., & Zatorre, R. J. (2001). Intensely pleasurable responses to music correlate with activity in brain regions implicated in reward and emotion. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 98(20), 11818-11823.
- Boersma, P., & Weenink, D. (2011). <http://www.praat.org> Amsterdam.
- Bonini-Baraldi, F. (2008). L'expérience de la musique instrumentale dans les veillées funéraires des Tsiganes de Transylvanie. *Frontières*, 20(2), 67-70.
- Bosnyak, D. J., Eaton, R. A., & Roberts, L. E. (2004). Distributed auditory cortical representations are modified when non-musicians are trained at pitch discrimination with 40 Hz amplitude modulated tones. *Cerebral Cortex*, 14, 1088-1099.
- Boysson-Bardie, B., Halle, P., Sagart, L., & Durand, C. (1989). A cross-linguistic investigation of vowel formants in babbling. *Journal of Child Language*, 16, 1-17.
- Brandler, S., & Rammsayer, T. H. (2003). Differences in mental abilities between musicians and non musicians. *Psychology of music*, 31(2), 123-138.
- Bregman, A. S. (1990). *Auditory Scene Analysis : The perceptual organization of sound*. Cambridge: Mass. MIT Press.
- Brochard, R., Dufour, A., & Després, O. (2004). Effect of musical expertise on visuospatial abilities: evidence from reaction times and mental imagery. *Brain and Cognition*, 54(2), 103-109.
- Brooks, R., & Meltzoff, A. N. (2005). The development of gaze following and its relation to language. *Developmental Science*, 8(6), 535-543.
- Brotons, M., & Koger, S. M. (2000). The impact of music therapy on language functioning in dementia. *Journal of Music Therapy*, 37(3), 183-195.

- Brown, L. A., De Bruin, N., Doan, J., Suchowersky, O., & Hu, B. (2010). Obstacle crossing among people with Parkinson disease is influenced by concurrent music. *Journal of Rehabilitation Research and Development*, 47(3), 225-231.
- Brown, S., & Martinez, M. J. (2007). Activation of premotor vocal areas during musical discrimination. *Brain and Cognition*, 63, 59-69.
- Brown, S., Martinez, M. J., & Parsons, L. M. (2006). The neural basis of human dance. *Cerebral Cortex*, 16(8), 1157-1167.
- Brown, S., Ngan, E., & Liotti, M. (2008). A larynx Area in the Human Motor Cortex. *Cerebral cortex*, 18, 837-845.
- Bruner, J. (1975). The ontogenesis of speech acts. *Journal of child language*, 2(1), 1-19.
- Bugos, J. A., Perlstein, W. M., McCrae, C. S., Brophy, T. S., & Bedenbaugh, P. H. (2007). Individualized piano instruction enhances executive functioning and working memory in older adults. *Aging & Mental Health*, 11(4), 464-471.
- Burkholder, R. A., & Pisoni, D. B. (2003). Speech timing and Working Memory in profoundly deaf children after cochlear implantation. *Journal of Experimental Child Psychology*, 85(1), 63-88.
- Burnett, T. A., & Larson, C. R. (2002). Early pitch-shift response is active in both steady and dynamic voice pitch control. *Journal of Acoustical Society of America*, 112(3 Pt 1), 4058-1063.
- Butzlaff, R. (2000). Can music be used to teach reading? *Journal of Aesthetic Education*, 34, 167-178.
- Cabeza, R. (2002). Hemispheric asymmetry reduction in older adults: The HAROLD model. *Psychology and Aging*, 17(1), 85-100.
- Callan, D. E., Tsytsarev, V., Hanakawa, T., Callan, A. M., Katsuhara, M., Fukuyama, H., et al. (2006). Song and speech: Brain regions involved with perception and covert production. *Neuroimage*, 31, 1327-1342.
- Calvert, S. L., & Tart, M. (1993). Song versus verbal forms for verylong-term, long-term, and short-term verbatim recall. *Journal of Applied Developmental Psychology*, 14, 245-260.
- Campbell, R., MacSweeney, M., & Waters, D. (2008). Sign language and the Brain: A Review. *Journal of Deaf Studies and Deaf Education*, 13(1), 3-20.
- Campisi, P. (2006). Multidimensional voice program analysis in profoundly deaf children: quantifying frequency and amplitude control. *Perceptual and Motor Skills*, 103(1), 40-50.
- Campisi, P., Low, A., Papsin, B. C., Mount, R., Cohen-Kerem, R., & Harrison, R. V. (2005). Acoustic Analysis pf the Voice in Pediatric Cochlear Implant Recipients: A Longitudinal Study. *Laryngoscope*, 115(6), 1046-1050.

- Carlson, S. M., & Meltzoff, A. N. (2008). Bilingual experience and executive functioning in young children. *Developmental Science*, 11(2), 282-298.
- Carroll, J. B. (1993). *Human Cognitive Abilities*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Casby, J. A., & Holm, M. B. (1994). The effect of music on repetitive disruptive vocalizations of persons with dementia. *The American Journal of Occupational Therapy*, 48(10), 883-889.
- Cassileth, B. R., Vickers, A. J., & Magill, L. A. (2003). Music therapy for mood disturbance during hospitalization for autologous stem cell transplantation : A randomized controlled trial. *Cancer*, 98(2723-2729).
- Cevasco, A. M., & Grant, R. E. (2003). Comparison of different methods for eliciting exercise-to-music for clients with Alzheimer's disease. *Journal of Music Therapy*, 40(1), 41-56.
- Champoux, F., Shiller, D. M., & Zatorre, R. (2011). Feel What You Say: An Auditory Effect on Somatosensory Perception. *Plos One*, 6(8), e22829.
- Chan, A. S., Ho, Y. C., & Cheung, M. C. (1998). Music training improves verbal memory. *Nature*, 396(6707), 128.
- Charlier, B., & Leybaert, J. (2000). The rhyming skills of deaf children educated with phonetically augmented speechreading. *The Quaterly Journal of Experimental Psychology Section A: Human Experimental Psychology*, 53(2), 349-375.
- Chartrand, J.-P., Peretz, I., & Belin, P. (2008). Auditory recognition expertise and domain specificity. *Brain Research*, 1220, 191-197.
- Chartrand, J. P., & Belin, P. (2006). Superior voice timbre processing in musicians. *Neuroscience Letters*, 405(3), 164-167.
- Chen, J. L., Penhune, V. B., & Zatorre, R. J. (2008). Listening to musical rhythms recruits motor regions of the brain. *Cerebral Cortex*, 18(12), 2844-2854.
- Chen, J. L., Zatorre, R. J., & Penhune, V. B. (2006). Interactions between auditory and dorsal premotor cortex during synchronization to musical rhythms. *Neuroimage*, 32(4), 1771-1781.
- Chen, S. H., Liu, H., Xu, Y., & Larson, C. R. (2007). Voice F0 responses to pitch-shifted voice feedback during English speech. *Journal of Acoustical Society of America*, 121(2), 1157-1163.
- Cleary, M., & Pisoni, D. B. (2002). Talker Discrimination by Prelingually Deaf Children with Cochlear Implants: Some Preliminary Results. *Annals of Otology Rhinology and Laryngology*, 111(5-Supplement), 113-118.
- Cleary, M., Pisoni, D. B., & Geers, A. E. (2001). Some Measures of Verbal and Spatial Working Memory in Eight- and Nine-Year-Old Hearing- Impaired Children with Cochlear Implants. *Ear Hearing*, 22(5), 395-411.

- Cleeremans, A., Destrebecqz, A., & Boyer, M. (1998). Implicit learning: news from the front. *Trends in Cognitive Sciences*, 2(10), 406-416.
- Cohen, W., Hodson, A., O'Hare, A., Boyle, J., Durrani, T., McCartney, E., et al. (2005). Effects of Computer-Based Intervention Through Acoustically Modified speech (Fast Forward) in Severe Mixed Receptive-Expressive Language Impairment. *Journal of Speech Language Hear Research*, 48(3), 715-729.
- Connor, C. M., Craig, H. K., Raudenbush, S. W., Heavner, K., & Zwolan, T. A. (2006). The Age at Which Young Deaf Children Receive Cochlear Implants and Their Vocabulary and Speech-Production Growth: Is There an Added Value for Early Implantation? *Ear Hearing*, 27(6), 628-644.
- Conrad, R. (1979). Deafness and reading ((1979). . In R. Conrad (Ed.), U. H. The deaf schoolchild (pp. 140–175). London & a Row., Trans.). In R. Conrad (Ed.), *The deaf schoolchild* (pp. 140-175). London, UK: Harper and Row.
- Conway, C. M., & Pisoni, D. B. (2008). Neurocognitive basis of implicit learning of sequential structures and its relations to language processing. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1145, 113-131.
- Conway, C. M., Pisoni, D. B., Anaya, E. M., Karpicke, J., & Henning, S. C. (2011). Implicit sequence learning in deaf children with cochlear implants. *Developmental Science*, 14(1), 1-14.
- Conway, C. M., Pisoni, D. B., & Kronenberger, W. G. (2009). The Importance of Sound for Cognitive Sequencing Abilities The Auditory Scaffolding Hypothesis. *Current Direction in Psychological Science*, 18(5), 275-279.
- Cooper, W. B., Tobey, E. A., & Loizou, P. B. (2008). Music Perception by Cochlear Implant and Normal Hearing Listeners as Measured by the Montreal Battery for Evaluation of Amusia. *Ear Hearing*, 29(4), 618-626.
- Cornett, O. (1967). Cued Speech. *American Annals of the Deaf*, 112, 3-13.
- Costa-Giomi, E. (2005). *Does music instruction improve fine motor abilities ?* Paper presented at the The Neurosciences and Music II: From Perception to Performance, Leipzig, Germany.
- Costa-Giomi, E., Gilmour, R., Sidell, J., & Lefebvre, E. (2001). Absolute Pitch, Early Musical Instruction and Spatial Abilities. *Annals of New York Academy of Sciences*, 930, 394-396.
- Cowan, N., Wood, N. L., Wood, P. K., Keller, T. A., Nugent, L. D., & Keller, C. V. (1998). Two separate verbal processing rates contributing to short-term memory span. *Journal of Experimental Psychology: General*, 127, 141-160.
- Cowles, A., Beatty, W. W., Nixon, S. J., Lutz, L. J., Paulk, J., Paulk, K., et al. (2003). Musical skill in dementia: a violinist presumed to have Alzheimer's disease learns to play a new song *Neurocase*, 9(6), 493-503.

- Cuddy, L. L., & Duffin, J. (2005). Music, memory and Alzheimer's disease: is music recognition spared in dementia, and how can it be assessed ? *Medical Hypotheses*, 64, 229-235.
- Cunningham, J. G., & Sterling, R. S. (1988). Developmental change in the understanding of affective meaning in music. *Motivation and Emotion*, 12(4), 399-413.
- Dalla Bella, S., Kraus, N., Overy, K., Pantev, C., Snyder, J. S., Tervaniemi, M., et al. (2009). *The Neurosciences and Music III. Disorders and Plasticity* (Vol. 1169). Boston: Annals of the New York Academy of Science.
- Dalla Bella, S., Peretz, I., Rousseau, L., & Gosselin, N. (2001). A developmental study of the affective value of tempo and mode in music. *Cognition*, 80(3), B1-B10.
- Darwin, C. (1871). *The Descent of Man, and Selection in Relation to Sex*. London: John Murray.
- Daveson, B. A., & Edwards, J. (2001). A descriptive study exploring the role of music therapy in prisons. *The Arts in Psychotherapy*, 28(2), 137-141.
- Dawson, P. W., & Clark, G. M. (1997). Changes in synthetic and natural novel perception after specific training for congenitally deafened patients using a multichannel *Ear Hearing*, 18(6), 488-501.
- De Boysson-Bardies, B. (2005). *Comment la parole vient aux enfants*. Paris: Odile Jacob poche.
- De Boysson-Bardies, B., Sagart, L., & Durand, C. (1984). Discernible differences in the babbling of infants according to target language. *Journal of Child Language*, 11(1), 1-15.
- De Raeve, L. (2010). A longitudinal study on auditory perception and speech intelligibility in deaf children implanted younger than 18 months in comparison to those implanted at later ages. *Otology & Neurotology*, 31(8), 1261-1267.
- Decasper, A. J., & Fifer, W. P. (1980). Of human bonding : Newborns prefer their mothers' voices. *Science*, 208, 1174-1176.
- Deqhan, A., & Scherer, R. C. (2011). Objective Voice Analysis of Boys With Profound Hearing Loss. *Journal of voice*, 25(2), e60-e64.
- Detable, C., & Vinter, A. (2006). Les capacités de transfert en situation d'apprentissage implicite chez des préadolescents présentant un retard mental. *Psychologie Française*, 51, 189-203.
- Dickson, D., & Grant, L. (2003). Physics karaoke: Why not ? *Physics Education*, 4, 320-323.
- Dietrich, V., Nieschalk, M., Stoll, W., Rajan, R., & Pantev, C. (2001). Cortical reorganization in patients with high frequency cochlear hearing loss. *Hearing Research*, 158(1-2), 95-101.

- Dillon, C. M., de Jong, K., & Pisoni, D. B. (2012). Phonological Awareness, Reading Skills, and Vocabulary Knowledge in Children Who Use Cochlear Implants. *Journal of Deaf Studies and Deaf Education*, 17(2), 205-226.
- Donaldson, G. S., & Nelson, D. A. (1999). Place-pitch sensibility and its relation to consonant recognition by cochlear implant listeners using the MPEAK and SPEAK speech processing strategies. *J. Acoust. Soc. Am*, 107(8W), 1645-1658.
- Donath, T. M., Nakte, U., & Kalveram, K. T. (2002). Effects of frequency-shifted auditory feedback on voice F0 contours in syllables. *Journal of Acoustical Society of America*, 111(1 Pt 1), 357-366.
- Drake, C., Penel, A., & Bigand, E. (2000). Tapping in time with mechanically and expressively performed music. *Music Perception*, 18, 1-25.
- Drury, H. A., & Van Essen, D. C. (1997). Functional specializations in human cerebral cortex analyzed using the Visible Man Surface-Based Atlas. *Human Brain Mapping*, 5(4), 233-237.
- Eggermont, J. J., & Ponton, C. W. (2003). Auditory-evoked Potentials Studies of Cortical Maturation in Normal Hearing and Implanted Children: Correlations in Changes in Structure and Speech Perception. *Acta Otorhinolaryngology*, 123(2), 249-252.
- Elbert, T., Pantev, C., Wienbruch, C., Rockstroh, B., & Taub, E. (1995). Increased Cortical Representation of the Fingers of the Left Hand in String Players. *Science*, 270, 305-307.
- Emmorey, K., Allen, J. S., Bruss, J., Schenker, N., & Damasio, H. (2003). A morphometric analysis of auditory brain regions in congenitally deaf adults. *PNAS*, 100(17), 10049-10054.
- Engineer, N. D., Percaccio, C. R., Pandya, P. K., Moucha, R., Rathbun, D. L., & Kilgard, M. P. (2004). Environmental enrichment improves response strength, threshold, selectivity, and latency of auditory cortex neurons. *Journal of Neurophysiology*, 92(1), 73-82.
- Evans, M. K., & Diliyski, D. (2007). Acoustic Voice Analysis of Prelingually Deaf Adults Before and After Cochlear Implantation. *Journal of voice*, 21(6), 661-668.
- Fagan, M. K., & Pisoni, D. B. (2010). Hearing Experience and Receptive Vocabulary Development in Deaf Children With Cochlear Implants. *Journal of Deaf Studies and Deaf Education*, 15(2), 149-161.
- Fagan, M. K., Pisoni, D. B., Horn, D. L., & Dillon, C. M. (2007). Neuropsychological Correlates of Vocabulary, Reading, and Working Memory in Deaf Children With Cochlear Implants. *J Deaf Stud Deaf Educ.*, 12(4), 461-471.
- Fallon, J. B., Irvine, D. R. F., & Shepherd, R. K. (2009). Cochlear implant use following neonatal deafness influences the cochleotopic organization of the primary auditory cortex in cats. *The Journal of Comparative Neurology*, 512(1), 101-114.

- Ferard, D. (2006). rééducation de l'enfant sourd profond : oralisme. In Solal (Ed.), *Précis d'Audiophonologie et de déglutition* (Vol. Tome 1, pp. 329-347). Marseille.
- Ferrer, A. J. (2007). The effect of live music on decreasing anxiety in patients undergoing chemotherapy treatment. *Journal of Music Therapy*, 44, 242–255.
- Figueras, B., Edwards, L., & Langdon, D. (2008). Executive Functions and Language in Deaf Children. *Journal of Deaf Studies and Deaf Education*, 13(3), 362-377.
- Filipic, S., Tillmann, B., & Bigand, E. (2010). Judging familiarity and emotion from very brief musical excerpts. *Psychonomic Bulletin & Review*, 17(3), 3335-3341.
- Finney, E. M., Fine, I., & Dobkins, K. R. (2001). Visual Stimuli activate auditory cortex in the deaf. *Nature Neurosciences*, 4(12), 1171-1173.
- Fitzgerald, M. B., & Wright, B. A. (2005). A perceptual learning investigation of the pitch elicited by amplitude-modulated noise. *Journal of Acoustical Society of America*, 118(6), 3794-3803.
- Flipsen, P. J. (2008). Intelligibility of spontaneous conversational speech produced by children with cochlear implants : A review. *International Journal of Otorhinolaryngology*, 72, 559-564.
- Flom, R., Gentile, D. A., & Pick, A. D. (2008). Infants' discrimination of happy and sad music. *Infant Behavior & Development*, 31(4), 716-728.
- Fodor, J. A. (1986). *La modularité de l'esprit* (A. Gerschenfeld, Trans.). Paris: Les éditions de Minuit.
- Forti, S., Filipponi, E., Di Berardino, F., Barozzi, S., & Cesarani, A. (2010). The influence of music on static posturography. Journal of vestibular research. *Journal of Vestibular Research : Equilibrium & Orientation*, 20(5), 351-356.
- Foster, N. A., & Valentine, E. R. (2001). The effect of auditory stimulation on autobiographical recall in dementia. *Experimental aging research*, 27, 215-228.
- Fu, Q.-J., & Galvin, J. J. (2008). Maximizing cochlear Implant Patients' Performance with Advanced Speech Training Procedures. *Hearing Research*, 242(1-2), 198-208.
- Fu, Q.-J., & Galvin, J. J. (2006). Recognition of simulated telephone speech by cochlear implant patients. *American Journal of Audiology*, 15(2), 127-132.
- Fu, Q. J., & Galvin, J. I. (2007). Perceptual Learning and Auditory Training in Cochlear Implant Recipients. *Trends in Amplification*, 11(3), 193-205.
- Fu, Q. J., Galvin, J. I., Wang, X., & Nogaki, G. (2005). Moderate auditory training can improve speech performance of adult cochlear implant users. *Acoustic Research Letters Online*, 6(3), 106-111.
- Fujioka, T., Ross, B., Kakigi, R., Pantev, C., & Trainor, L. J. (2006). One Year of Musical Training affects development of auditory cortical-evoked fields in young children. *Brain*, 129(10), 2593-2608.

- Fujioka, T., Trainor, L. J., Ross, B., Kakigi, R., & Pantev, C. (2004). Musical training enhances automatic encoding of melodic contour and interval structure. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 16(6), 1010-1021.
- Fukui, H. (2001). Music and testosterone: A new hypothesis for the origin and function of music. *Annals of the New York Academy of Science*, 930, 448-451.
- Fukui, H., & Toyoshima, K. (2008). Music facilitate the neurogenesis, regeneration and repair of neurons. *Medical Hypotheses*, 71(5), 765-769.
- Gaab, N., Tallal, P., Kim, H., Lakhminarayanan, K., Archie, J. J., Glover, G. H., et al. (2006). Neural Correlates of Rapid Spectrotemporal Processing in Musicians and Nonmusicians. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1060(1), 82-88.
- Galvin, J. J. I., Fu, Q.-J., & Nogaki, G. (2007). Melodic Contour Identification by Cochlear Implant Listeners. *Ear Hearing*, 28(3), 302-319.
- Gardiner, M. F., Fox, A., Knowles, F., & Jeffrey, D. (1996). Learning improved by arts training. *Nature*, 381(6580), 284.
- Gaser, C., & Schlaug, G. (2003). Brain Structures Differ between Musicians and Non-Musicians. *Journal of Neuroscience*, 23(27), 9240-9245.
- Geers, A. E. (2004). Speech, Language, and Reading Skills After Early Cochlear Implantation. *Archives of Otorhinolaryngology Head & Neck Surgery* 130(5), 634-638.
- Geers, A. E., Nicholas, J. G., & Moog, J., S. (2007). Estimating the Influence of Cochlear Implantation on Language Development in Children. *Audiol. Med.*, 5(4), 262-273.
- Gfeller, K., Christ, A., Knuston, J. F., Witt, S., Murray, K. T., & Tyler, R. S. (2000). Musical backgrounds, listening habits, and aesthetic enjoyment of adult cochlear implant recipients. *Journal of the American Academy of Audiology*, 11(7), 390-406.
- Gfeller, K., Witt, S., Spencer, L., Stordhal, J., & Tomblin, B. (1999). Musical Involvement and Enjoyment of Children Who Use Cochlear Implants. *Volta Review*, 100(4), 213-233.
- Gfeller, K., Wtt, S., Adamek, M., Mehrt, M., Rogers, J., Stordahl, J., et al. (2002). Effects of Training on Timbre Recognition and Appraisal by Postlingually Deafened Cochlear Implant Recipients. *Journal of American Academy of Audiology*, 13, 132-145.
- Gillam, R. B., Loeb, D. F., Hoffman, L. M., Bohman, T., Champlin, C. A., Thibodeau, L., et al. (2008). The Efficacy of Fast ForWord Language Intervention in School-Age Children With Language Impairment: A Randomized Controlled Trial. *Journal of Speech Language Hear Research*, 51(1), 97-119.
- Gilley, P. M., Sharma, A., & Dorman, M. F. (2008). Cortical reorganization in children with cochlear implants. *Brain Research*, 1239(6), 56-65.
- Gillon, G. T. (2004). *Phonological Awareness: From research to practice*. New York: Guilford Publications.

- Giraud, A.-L., Price, C. J., Graham, J. M., & Frackowak, R. S. J. (2001). Functional plasticity of language-related areas after cochlear implantation. *Brain*, 124(7), 1307-1316.
- Giraud, A.-L., Price, C. J., Graham, J. M., Truy, E., & Frackowak, R. S. J. (2001). Cross-Modal Plasticity Underpins Language Recovery after Cochlear Implantation. *Neuron*, 30(3), 657-664.
- Gold, C., Wigram, T., & Elefant, C. (2006). Music therapy for autistic spectrum disorder. *Cochrane Database of Systematic Reviews*, 004381.
- Gomez, P., & Danuser, B. (2007). Relationships between musical structure and psychophysiological measures of emotion. *Emotion*, 7(377-387).
- Goto, Y., Noda, R., Ichikawa, N., & Fujiwarav, M. (2002). Cerebral circulation of consciousness disorder patient using near-infrared spectroscopic topography during brain rehabilitation by music exercise therapy. *International Congress Series*, 1232, 549-554.
- Grant, M. D., & Brody, J. A. (2004). Musical experience and dementia. Hypothesis. *Aging Clinical and Experimental Research*, 16, 403-405.
- Grape, C., Sandgren, M., Hansson, L., Ericson, M., & Theorell, T. (2003). Does singing promote well-being? An empirical study of professional and amateur singers during a singing lesson. *Integrative physiological and behavioral science : The official journal of the Pavlovian Society*, 38(1), 65-74.
- Green, K. M. J., Ramsden, R. T., Julyan, P. J., & Hastings, D. E. L. (2008). Cortical plasticity in the first year after cochlear implantation. *Cochlear implants international*, 9(2), 103-117.
- Groussard, M., La Joie, R., Rauchs, G., Landeau, B., Chételat, G., Viader, F., et al. (2010). When music and long-term memory interact: Effects of musical expertise on functional and structural plasticity in the hippocampus. *PLoS One*, 5(10), e13225.
- Gruhn, W., Galley, N., & Kluth, C. (2003). Do mental speed and musical abilities interact? *Annals of the New York Academy of Science*, 999(1), 485-493.
- Guenther, F. H., Ghosh, S. S., & Tourville, J. A. (2006). Neural modeling and imaging of the cortical interactions underlying syllable production. *Brain and Language*, 96(3), 280-301.
- Guétin, S., Ginies, P., Blayac, J.-P., & Eledjam, J.-J. (2005). Une nouvelle technique contrôlée de musicothérapie dans la prise en charge des douleurs viscérales aiguës et chroniques. *Douleur et Analgésie*, 18(1), 19-25.
- Haas, F., Distenfeld, S., & Axen, K. (1986). Effects of perceived musical rhythm on respiratory pattern. *Journal of Applied Physiology*, 61(3), 1185-1191.
- Habib, M., & Besson, M. (2008). Langage, musique et plasticité cérébrale : perspectives pour la rééducation. *Revue de Neuropsychologie*, 18(n° 1-2).

- Hadjikhani, N., Joseph, R. M., Snyder, J., & Tager-Flusberg, H. (2006). Anatomical differences in the mirror neuron system and social cognition network in autism. *Cerebral cortex*, 16(9), 1276-1282.
- Hallam, S., Cross, I., & Thaut, M. (2009). *The Oxford Handbook of Music Psychology*. Oxford, NY: Oxford University Press.
- Halpern, A. R., & Bartlett, J. C. (2002). Aging and memory for music: A review. *Psychomusicology*, 18, 10-27.
- Hannon, E. E., & Trainor, L. J. (2007). Music acquisition: effects of enculturation and formal training on development. *Trends in Cognitive Sciences*, 11(11), 466-472.
- Harris, M. S., Pisoni, D. B., Kronenberger, W. G., Gao, S., Caffrey, H. M., & Miyamoto, R. T. (2011). Developmental trajectories of forward and backward digit spans in deaf children with cochlear implants. *Cochlear implants international*, 12((Suppl. 1)), s84-s88.
- HAS. (2007). *Evaluation du dépistage néonatal systématique de la surdité permanente bilatérale*. <http://has-sante.fr>
- Haueisen, J., & Knösche, T. R. (2001). Involuntary motor activity in pianists evoked by music perception. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 13(6), 786-792.
- Hauser, P. C., Lukomski, J., & Hillman, T. (2008). Development of Deaf and Hard-of-Hearing Students' Executive Function. In O. U. Press (Ed.), *Deaf Cognition* (pp. 286-308). New York.
- Hayes, E. A., Warrier, C., Nicol, T., Zecker, S., & Kraus, N. (2003). Neural plasticity following auditory training in children with learning problems. *Clinical Neurophysiology*, 114(4), 673-684.
- Hayes, H., Geers, A. E., Treiman, R., & Moog, J., S. (2009). Receptive Vocabulary Development in Deaf Children with Cochlear Implants: Achievement in an Intensive Auditory-Oral Educational Setting. *Ear Hearing*, 30(1), 128-135.
- Heid, S., Jähn-Siebert, T. K., Klinke, R., Hartmann, R., & Langner, G. (1997). Afferent projection patterns in the auditory brainstem in normal and congenitally deaf white cats. *Hearing Research*, 110(1-2), 191-199.
- Helenius, P., Salmelin, R., Richardson, U., Leinonen, S., & Lyytinen, H. (2002). Abnormal auditory cortical activation in dyslexia 100 msec after speech onset. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 14(4), 603-617.
- Herdener, M., Esposito, F., di Salle, F., Bollner, C., Hilti, C. C., Habermeyer, B., et al. (2010). Musical training induces functional plasticity in human hippocampus. *Journal of Neurosciences*, 30(4), 1377-1384.
- Hesse, G., Nelting, N., Nohrmann, B., Laubert, A., & Ptak, M. (2001). Die stationäre Intensivtherapie bei auditiven Verarbeitungs- und Wahrnehmungsstörungen im Kindesalter. *HNO*, 49, 636-641W.

- Hickok, G., Bellugi, U., & Klima, E. S. (1998). The neural organization of language: evidence from sign language aphasia. *Trends in Cognitive Sciences*, 2(4), 129-136.
- Ho, Y. C., Cheung, M. C., & Chan, A. S. (2003). Music training improves verbal but not visual memory: cross-sectional and longitudinal explorations in children. *Neuropsychology*, 17(3), 439-450.
- Holmes, C., Knights, A., Dean, C., Hodkinson, S., & Hopkins, V. (2006). Keep music live: music and the alleviation of apathy in dementia subjects. *International Psychogeriatrics*, 18(4), 623-630.
- Hopyan-Misakyan, T. M., Gordon, K. A., Dennis, M., & Papsin, B. C. (2009). Recognition of Affective Speech Prosody and Facial Affect in Deaf Children with Unilateral Right Cochlear Implants. *Child Neuropsychology*, 15(2), 136-146.
- Hopyan, T., Gordon, K. A., & Papsin, B. C. (2011). Identifying emotions in music through electrical hearing in deaf children using cochlear implants. *Cochlear implants international*, 12(1), 21-26.
- Horn, D. L., Davis, R. A. O., Pisoni, D. B., & Miyamoto, R. T. (2005). Development of visual attention skills in prelingually deaf children who use cochlear implants. *Ear Hearing*, 26(4), 389-408.
- Horn, D. L., Pisoni, D. B., & Miyamoto, R. T. (2006). Divergence of fine and gross motor skills in prelingually deaf children: implications for cochlear implantation. *Laryngoscope*, 116(8), 1500-1506.
- Hornickel, J., Skoe, E., Nicol, T., Zecker, S., & Kraus, N. (2009). Subcortical differentiation of voiced stop consonants: relationships to reading and speech in noise perception. *PNAS*, 106(31), 13022-13027.
- Houde, J. F., & Jordan, M. I. (1998). Sensorimotor adaptation in speech production. *Science*, 279(5354), 1213-1216.
- Houston, D. M., Pisoni, D. B., Kirk, K. I., Ying, E. A., & Miyamoto, R. T. (2003). Speech perception skills of deaf infants following cochlear implantation: A first report. *International Journal of Pediatric Otorhinolaryngology*, 67(5), 179-195.
- Hu, Z., Ulfendahl, M., & Olivius, N. P. (2005a). NGF stimulates extensive neurite outgrowth from implanted dorsal root ganglion neurons following transplantation into the adult rat inner ear. *Neurobiology of Disease*, 18(1), 184-192.
- Huber, J. E., Stathopoulos, E., Curione, G. M., Ash, T. M., & Johnson, K. (1999). Formants of children, women, and men: The effects of vocal intensity variation. *Journal of Acoustical Society of America*, 106(3), 1532-1542.
- Hughes, C. (1998). Execution function in preschoolers: Links with theory of mind and verbal ability. *British Journal of Developmental Psychology*, 16, 233-253.
- Huron, D. (2001). Is Music an Evolutionary Adaptation? *Annals of the New York Academy of Sciences*, 930, 43-61.

- Hyde, K. L., Lerch, J., Norton, A., Forgeard, M., Winner, E., Evans, A. C., et al. (2009). Musical training shapes structural brain development. *Journal of Neuroscience*, 29(10), 3019-3025.
- Irish, M., Cunningham, C. J., Walsh, J. B., Coakley, D., Lawlor, B. A., Robertson, I. H., et al. (2006). Investigating the enhancing effect of music on autobiographical memory in mild Alzheimer's disease. *Dementia and geriatric cognitive disorders*, 22, 108-120.
- Iyer, S. N., & Oller, D. K. (2008). Fundamental frequency development in typically developing infants and severe-to-profound hearing loss. *Clinical Linguistics & Phonetics*, 22(12), 917-936.
- Izumikawa, M., Minoda, R., Kawamoto, K., Abrashkin, K. A., Swiderski, D. L., Dolan, d. F., et al. (2005). Auditory hair cell replacement and hearing improvement by Atoh1 gene therapy in deaf mammals. *Nature Medicine*, 11(2), 271-276.
- Jamblique. (2009). *Vie de Pythagore*.
- Janata, P. (2009). The neural architecture of music-evoked autobiographical memories. *Cerebral Cortex*, 19(11), 2579-2594.
- Janata, P., Tomic, S. T., & Rakowski, S. K. (2007). Characterization of music-evoked autobiographical memories. *Memory*, 15(8), 845-860.
- Jäncke, L. (2009). Music drives brain plasticity. *F1000 Biology Reports*, 1(78).
- Jäncke, L. (2008). Music, memory and emotion. *Journal of Biology*, 7(6), 21.
- Jäncke, L., Gaab, N., Wüstenberg, T., Scheich, H., & Heinze, H.-R. (2001). Short-term functional plasticity in the human auditory cortex: An fMRI study. *Cognitive Brain Research*, 12(3), 479-485.
- Jäncke, L., Schlaug, G., & Steinmetz, H. (1997). Hand Skill Asymetry in Professional Musicians. *Brain and Cognition*, 34, 424-432.
- Jäncke, L., Wüstenberg, T., Scheich, H., & Heinze, H.-R. (2002). Phonetic Perception and the Temporal Cortex. *Neuroimage*, 15(4), 733-746.
- Jentschke, S., & Koelsch, S. (2009). Musical training modulates the development of syntax processing in children. *Neuroimage*, 47, 735-744.
- Jentschke, S., Koelsch, S., Sallat, S., & Friederici, A. D. (2008). Children with Specific Language Impairment also show impairment of music-syntactic processing. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 20(11), 1940-1951.
- Jerger, S., Martin, R., Pearson, D. A., & Dihn, T. (1995). Childhood hearing impairment: Auditory and linguistic interactions during multidimensional speech processing. *Journal of Speech Language Hear Research*, 38(4), 930-948.
- Johnson, J. K., Cotman, C. W., Tasaki, C. S., & Shaw, G. L. (1998). Enhancement of spatial-temporal reasoning after a Mozart listening condition in Alzheimer's disease: a case study. *Neurological Research*, 20(8), 666-672.

- Johnson, K. L., Nicol, T., & Kraus, N. (2005). Brain stem response to speech: A biological marker of auditory processing. *Ear Hearing*, 26(5), 424-434.
- Jusczyk, P. W., & Aslin, R. N. (1995). Infants' detection of sounds patterns of words in fluent speech. *Cognitive Psychology*, 29(1-23).
- Jusczyk, P. W., & Krumhansl, C. L. (1993). Pitch and rhythmic patterns affecting infants' sensitivity to musical phrase structure. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 19(3), 627-640.
- Juslin, P. N., & Västfjäll, D. (2008). Emotional responses to music: the need to consider underlying mechanisms. *The Behavioral and brain sciences*, 31(5), 559-575.
- Karpicke, J. D., & Pisoni, D. B. (2004). Using immediate memory span to measure implicit learning. *Memory & Cognition*, 32(6), 956-964.
- Keen, A. W. (2004). Using music as a therapy tool to motivate troubled adolescents. *Social Work in Health Care*, 39(3-4), 361-373.
- Kensinger, E. A., & Corkin, S. (2003). Memory enhancement for emotional words: Are emotional words more vividly remembered than neutral words? *Memory and Cognition*, 31(8), 1169-1180.
- Khalifa, S., Dalla Bella, S., Roy, M., Peretz, I., & Blondin, J. P. (2003). Effects of relaxing music on salivary cortisol level after psychological stress. *Annals of the New York Academy of Science*, 999, 374-376.
- Kirschner, S., & Tomasello, M. (2009). Joint drumming: Social context facilitates synchronization in preschool children. *Journal of Experimental Child Psychology*, 102(3), 299-314.
- Koelsch, S. (2005). Neural substrates of processing syntax and semantics in music. *Current Opinion in Neurobiology*, 15, 1-6.
- Koelsch, S. (2009). A neuroscientific perspective on music therapy. *Annals New York Academy of Science*, 1169, 374-384.
- Koelsch, S. (2010). Towards a neural basis of music-evoked emotions. *Trends in Cognitive Sciences*, 14(2), 131-137.
- Koelsch, S., Gunter, T. C., Schröger, E., Tervaniemi, M., Sammler, D., & Friederici, A. D. (2001). Differentiating ERAN and MMN: an ERP study. *Neuroreport*, 12(7), 1385-1389.
- Koelsch, S., Schulze, K., Sammler, D., Fritz, T., Müller, K., Gruber, O. (2009). Functional architecture of verbal and tonal working memory: An fMRI study. *Human Brain Mapping*, 30 (3), 859-873.
- Koelsch, S., Wittfoth, M., Wolf, A., Müller, J., & Hahne, A. (2004). Music perception in cochlear implant users: an event-related potential study. *Clinical Neurophysiology*, 115(4), 966-972.

- Kong, Y. Y., Cruz, R., Jones, J. A., & Feng, F. G. (2004). Music perception with temporal cues in acoustic and electric hearing. *Ear Hearing*, 25(2), 173-185.
- Kotby, M., Wafy, W., Rifaie, N., Abdel-Nasserr, N., Aref, E., & Elsharkawy, A. (1996). A. Multidimensional analysis of speech of hearing impaired children. *Scand Audiol.* , 1996(25 (suppl. 42)), 25-31.
- Kral, A., & Eggermont, J. J. (2007). What's to lose and what's to learn : Development under auditory deprivation, cochlear implants and limits of cortical plasticity. *Brain Research Reviews*, 56, 259-269.
- Kral, A., Hartmann, R., Tillein, J., & Heide, S. (2000). Congenital Auditory Deprivation Reduces Synaptic Activity Within the Auditory Cortex in a Layer-Specific Manner. *Cerebral cortex*, 10(7), 714-726.
- Kral, A., Tillein, J., Heide, S., Hartmann, R., & Klinke, R. (2005). Postnatal cortical development in congenital auditory deprivation. *Cerebral cortex*, 15(5), 552-562.
- Kraus, N., & Chandrasekaran, B. (2010). Music training for the development of auditory skills. *Nature Reviews. Neuroscience*, 11(8), 599-605.
- Kraus, N., McGee, T. J., Carrell, T. D., Zecker, S. G., Nicol, T. G., & Koch, D. B. (1996). Auditory neurophysiologic responses and discrimination deficits in children with learning problems. *Science*, 273(5277), 971-973.
- Kraus, N., & Nicol, T. (2010). The Musician's Auditory World. *Acoustics Today*, 6(3), 15-26.
- Kreutz, G., Bongard, S., Rohrman, S., Hodapp, V., & Grebe, G. (2004). Effects of choir singing or listening on secretory immunoglobulin A, cortisol, and emotional state. *Journal of Behavioral Medicine*, 27(6), 623-633.
- Kuhl, P. K. (2010). Brain Mechanisms in Early Language Acquisition. *Neuron*, 67(5), 713-727.
- Kuhl, P. K., & Rivera-Gaxiola, M. (2008). Neural substrates of language acquisition. *Annual Review of Neuroscience*, 31, 511-534.
- Kuhl, P. K., Williams, K. A., Lacerda, F., Stevens, K. N., & Lindblom, B. (1992). Linguistic experience alters phonetic perception in infants by 6 months of age. *Science*, 255, 606-608.
- Kujala, T., Karma, K., Ceponiene, R., Belitz, S., Turkila, P., Tervaniemi, M., et al. (2001). Plastic neural changes and reading improvement caused by audiovisual training in reading-impaired children. *PNAS*, 98(18), 10509-10514.
- Lahav, A., Saltzman, E., & Schlaug, G. (2007). Action representation of sound: audiomotor recognition network while listening to newly acquired actions. *Journal of Neuroscience*, 27(2), 308-314.
- Lai, H. L., & Good, M. (2005). Music improves sleep quality in older adults. *Journal of Advanced Nursing*, 49(3), 234-244.

- Lamont, A. (2003). *Musical Preference and Musical Memory in the Early Years*. Paper presented at the The Neurosciences and Music.
- Lane, H., & Webster, J. (1991). Speech deterioration in postlingually deafened adults. *Journal of Acoustical Society of America*, 89, 859-866.
- Lappe, C., Herholz, S. C., Trainor, L. J., & Pantev, C. (2008). Cortical Plasticity Induced by Short-Term Unimodal and Multimodal Musical Training. *Journal of Neuroscience*, 28(39), 9632-9639.
- Larson, C. R., Altman, K. W., Liu, H., & Hain, T. C. (2008). Interactions between auditory and somatosensory feedback for voice F0 control. *Experimental Brain Research*, 187(4), 613-621.
- Latendresse, C., Larivée, S., & Miranda, D. (2006). La portée de l'« effet Mozart ». Succès souvenirs, fausses notes et reprises. *Canadian Psychology*, 47(2), 125-141.
- Lazard, D. S., Lee, H.-J., Gaebler, M., Kell, C. A., Truy, E., & Giraud, A.-L. (2010). Phonological processing in post-lingual deafness and cochlear implant outcome. *Neuroimage*, 49(4), 3443-3451.
- Lazeyras, F., Boex, C., Sigrist, A., Seghier, M. L., Cosendai, G., Terrier, F., et al. (2002). Functional MRI on auditory cortex activated by multisite electrical stimulation of the cochlea. *Neuroimage*, 17(2), 1010-1017.
- Le Huche, F., & Allali, A. (1991). *La voix. Anatomie et physiologie des organes de la voix et de la parole* (Vol. 1). Paris: Masson.
- Lee, C. Y., & Hung, T. H. (2008). Identification of Mandarin tones by English-speaking musicians and nonmusicians. *Journal of Acoustical Society of America*, 12(5), 3235-3248.
- Lee, D. J., Chen, Y., & Schlaug, G. (2003). Corpus callosum: musician and gender effects. *Neuroreport*, 14(2), 205-209.
- Lee, D. S., Lee, J. S., Oh, S.-H., Kim, S.-K., Chung, J.-K., Lee, M. C., et al. (2001). Cross-modal plasticity and cochlear implants. *Nature*, 409(6817), 149-150.
- Lee, H.-J., Truy, E., Mamou, G., Sappey-Marini, D., & Giraud, A.-L. (2007). Visual speech circuits in profound acquired deafness: a possible role for latent multimodal connectivity. *Brain*, 130(11), 2929-2941.
- Lee, S., Potamianos, A., & Narayanan, S. (1999). Acoustics of children's speech: developmental changes of temporal and spectral parameters. *Journal of Acoustical Society of America*, 105(3), 1455-1468.
- Levänen, S., Jousmäki, V., & Hari, R. (1998). Vibration-induced auditory-cortex activation in a congenitally deaf adult. *Current Biology*, 8(15), 869-872.
- Leybaert, J. (2000). Phonology acquired through the eyes and spelling in deaf children. *Journal of Experimental Child Psychology*, 75(4), 291-318.

- Leybaert, J., & Charlier, B. (1996). Visual Speech in the Head: The Effect of Cued-Speech on Rhyming, Remembering, and Spelling. *Journal of Deaf Studies and Deaf Education*, 1(4), 234-248.
- Lidji, P., Kolinsky, R., Lochy, A., & Morais, J. (2007). Spatial associations for musical stimuli: A piano in the head? *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 33(5), 1189-1207.
- Lim, I., Van Wegen, E., De Goede, C., Deutekom, M., Nieuwboer, A., Willems, S., et al. (2005). Effects of external rhythmical cueing on gait in patients with Parkinson's disease: A systematic review. *Clinical Rehabilitation*, 19(7), 695-713.
- Logan, J. M., Sanders, A. L., Snyder, A. Z., Morris, J. C., & Buckner, R. L. (2002). Under-recruitment and nonselective recruitment: Dissociable neural mechanisms associated with aging. *Neuron*, 33(5), 827-840.
- Lombard, E. (1911). Le signe de l'élévation de la voix. *Annales Mal. Oreille Larynx*, 37, 101-119.
- Looi, V., McDermott, H., & McKay, C. (2008). Music Perception of Cochlear Implant Users Compared with that of Hearing Aids Users. *Ear Hearing*, 29(3), 421-434.
- Loucks, T. M., Poletto, C. J., Simonyan, K., Reynolds, C. L., & Ludlow, C. L. (2007). Human brain activation during phonation and exhalation: common volitional control for two upper airway functions. *Neuroimage*, 36(1), 131-143.
- Ludlow, C. L. (2005). Central nervous system control of the laryngeal muscles in humans. *Respir. Physiol. Neurobiol.*, 147(2), 205-222.
- MacAdams, S., & Bigand, E. (1994). *Penser les sons, Psychologie cognitive de l'audition*. Paris: PUF.
- MacSweeney, M., Woll, B., Campbell, R., McGuire, P. K., David, A. S., Williams, S. C. R., et al. (2002). Neural systems underlying British Sign Language and audio-visual English processing in native users. *Brain*, 125(7), 1583-1593.
- Magne, C., Schön, D., & Besson, M. (2006). Musician children detect pitch violations in both music and language: Behavioral and electrophysiological approaches. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 18(199-211).
- Mandel, D. R., Jusczyk, P. W., & Kemler-Nelson, D. G. (1994). Does sentential prosody help infants organize and remember speech information? *Cognition*, 53, 155-180.
- Mandel, D. R., Jusczyk, P. W., & Pisoni, D. B. (1995). Infants' recognition of the sound patterns of their own names. *Psychological Science*, 6, 315-318.
- Mandel, S. E., Hanser, S. B., Secic, M., & Davis, B. A. (2007). Effects of music therapy on health-related outcomes in cardiac rehabilitation: A randomized controlled trial. *Journal of Music Therapy*, 44, 176-197.

- Margulis, E. H., Mlsna, L. M., Uppunda, A. K., Parrish, T., & Wong, P. (2009). Selective neurophysiologic responses to music in instrumentalists with different listening biographies. *Human Brain Mapping, 30*(1), 267-275.
- Marie, C., Delogu, F., Lampis, G., Belardinelli, M. O., & Besson, M. (2011). Influence of musical expertise on segmental and tonal processing in Mandarin Chinese. *Journal of Cognitive Neuroscience, 23*(10), 2701-2715.
- Marie, C., Magne, C., & Besson, M. (2011). Musicians and the metric structure of words. *Journal of Cognitive Neuroscience, 23*(2), 294-305.
- Marques, C., Moreno, S., Castro, S. L., & Besson, M. (2007). Musicians detect pitch violation in a foreign language better than nonmusicians: Behavioral and electrophysiological evidence. *Journal of Cognitive Neuroscience, 19*(9), 1453-1463.
- Matsumiya, Y., Tagliasco, V., Lombroso, C. T., & Goodglass, H. (1972). AUditory evoked response; meaningfulness of stimuli and interhemispheric asymetry. *Science, 331*, 585-589.
- Mayberry, R. I. (2002). Cognitive development in deaf children: the interface of language and perception in neuropsychology. In S. J. S. I. Rapin (Ed.), *Handbook of Neuropsychology* (2nd Edition ed., Vol. 8, pp. 71-107). Amsterdam: Saunders Ltd.
- Mayer, D. (2008). Les appareils auditifs. *Bulletin d'information du CSSS du Lac-des-Deux-Montagnes, 3*(3), 6.
- Mc Gowan, R., S., Nittrouer, S., & Chenausky, K. (2008). Speech Production in 12-Month-Old Children with and without Hearing Loss. *Journal of Speech Language Hearing Research, 51*(4), 879-888.
- McAdams, S. (1994). La reconnaissance de sources et d'évènements sonores. In PUF (Ed.), *Penser les sons* (pp. 157-213). Paris.
- McAdams, S., & Bigand, E. (1994). *Penser les sons, Psychologie cognitive de l'audition*. Paris: PUF.
- McAdams, S., Winsberg, S., Donnadieu, S., De Soete, G., & Krimphoff, J. (1995). Perceptual scaling of synthesized musical timbres; common dimensions, specificities, and latent subject classes. *Psychological Research, 58*(3), 177-192.
- McDermott, H. (2004). Music Perception with Cochlear Implants: a Review. *Trends in Amplification, 8*(2), 49-82.
- McElhinney, M., & Annett, J. M. (1996). Pattern of efficacy of a musical mnemonic on recall of familiar words over several presentations. *Perceptual and motor skills, 82*(2), 395-400.
- McGarr, N., & Osberger, N. (1978). Pitch deviancy and intelligibility of deaf speech. *Journal of communication Disorders, 11*, 237-247.

- McIntosh, G. C., Brown, S. H., Rice, R. R., & Thaut, M. H. (1997). Rhythmic auditory-motor facilitation of gait patterns in patients with Parkinson's disease. *Journal of Neurology, Neurosurgery, and Psychiatry*, 62(1), 22-26.
- Medina, S. L. (1993). The effect of music on second language vocabulary acquisition. *National Network for Early Language Learning*, 6, 1-8.
- Mehler, J., Jusczyk, P. W., Lambertz, G., & Hasted, N. (1988). A precursor of language acquisition in young infants. *Cognition*, 29, 143-178.
- Meister, I. G., Buelte, D., Staedtgen, M., Boroojerdi, B., & Sparing, R. (2009). The dorsal premotor cortex orchestrates concurrent speech and fingertapping movements. *The European Journal of Neuroscience*, 29(10), 2074-2082.
- Menon, V., & Levitin, D. J. (2005). The rewards of music listening: response and physiological connectivity of the mesolimbic system. *Neuroimage*, 28(1), 175-184.
- Merzenich, M. M., Jenkins, W. M., Johnson, P., Schreiner, C., Miller, S. L., & Tallal, P. (1996). Temporal processing deficits of language-learning impaired children ameliorated by training. *Science*, 271(5245), 77-81.
- Micheyl, C., Delhommeau, K., Perrot, X., & Oxenham, A. J. (2006). Influence of musical and psychoacoustical training on pitch discrimination. *Hearing Research*, 219(1-2), 36-47.
- Millotte, S., Morgan, J., Margules, S., Bernal, S., Dutat, M., & Christophe, A. (2010). Phrasal prosody constrains word segmentation in French 16-month-olds. *Journal of Portuguese Linguistics*, 9(2), 67-86.
- Mitani, C., Nakata, T., Trehub, S., Kanda, Y., Kumagami, H., Tabasaki, K., et al. (2007). Music recognition, music listening, and word recognition by deaf children with cochlear implants. *Ear Hearing*, 28(Supplement), 29-33.
- Mithen, S. (2009). The music instinct: the evolutionary basis of musicality. *Annals of the New York Academy of Science*, 1169, 3-12.
- Mithen, S. (2005). *The singing Neanderthals: The origins of music, language, mind and body*. London: Weidenfeld and Nicholson.
- Miyake, A., Friedman, N. P., Emerson, M. J., Witski, A. H., Howerter, A., & Wager, T. D. (2000). The unity and diversity of executive functions and their contribution to complex "frontal lobe" tasks: A latent variable analysis. *Cognitive Psychology*, 41(1), 49-100.
- Mohr, P. E., Feldman, J. J., Dunbar, J. L., McConkey-Robbins, A., Niparko, J. K., Rittenhouse, R. K., et al. (2000). The Societal costs of severe to profound hearing loss in the United States. *International Journal of Technology Assessment in Health Care*, 16(4), 1120-1135.
- Molinari, M., Leggio, M. G., De Martin, M., Cerasa, A., & Thaut, M. H. (2003). Neurobiology of rhythmic motor entrainment. *Annals of the New York Academy of Science*, 999, 313-321.

- Moore, D. R. (1992). Trophic influences of excitatory and inhibitory synapses on neurones in the auditory brainstem. *NeuroReport*, 3(3), 269-272.
- Moore, J. K., Niparko, J. K., Miller, G. A., & Linthicum, F. H. (1994). Effect of Profound Hearing Loss on A Central Auditory Nucleus. *American Journal of Otology*, 15(5), 588-595.
- Moreno, S., Marques, C., Santos, A., Santos, M., Castro, S. L., & Besson, M. (2009). Musical training influences linguistic abilities in 8-year-old children: more evidence for brain plasticity. *Cerebral Cortex*, 19(3), 712-723.
- Morrison, S. (1998). Computer applications: Earobics *Child Language Teaching & Therapy*, 14(3), 279-284.
- Most, T., & Aviner, C. (2009). Auditory, Visual, and Auditory-Visual Perception of Emotions by Individuals With Cochlear Implants, Hearing Aids, and Normal Hearing. *Journal of Deaf Studies and Deaf Education*, 14(4), 449-464.
- Most, T., & Peled, M. (2007). Perception of Suprasegmental Features of Speech by Children With Cochlear Implants and Children With Hearing Aids. *Journal of Deaf Studies and Deaf Education* 12(3), 350-361.
- Moussard, A., Bigand, E., Belleville, S., & Peretz, I. (in press). Music as an aid to learn new verbal information in Alzheimer's disease. *Music Perception*.
- Musacchia, G., Sams, M., Skoe, E., & Kraus, N. (2007). Musicians have enhanced subcortical auditory and audiovisual processing of speech and music. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 104(40), 15894-15898.
- Musacchia, G., Strait, D., & Kraus, N. (2008). Relationships between behavior, brainstem and cortical encoding of seen and heard speech in musicians and non-musicians. *Hearing Research*, 241, 34-42.
- Nairne, J. S., Thompson, S. R., & Pandeirada, J. N. (2007). Adaptive memory: Survival processing enhances retention. *Journal of Experimental Psychology : Learning, Memory and Cognition*, 33(3), 263-273.
- Nakata, T., & Trehub, S. (2004). Infants' responsiveness to maternal speech and singing. *Infant Behavior & Development*, 27, 455-464.
- Nakata, T., Trehub, S., Kanda, Y., Shibasaki, A., & Schellenberg, E. G. (2005). Music recognition by Japanese children with cochlear implants. *Journal of Physiological Anthropol. Applied Human Sciences*, 24(1), 29-32.
- Nakata, T., Trehub, S., Mitani, C., & Kanda, Y. (2006). Pitch and Timing in the Songs of Deaf Children with Cochlear Implants. *Music Perception*, 24(2), 147-154.
- Nakte, U., donath, T. M., & Kalveram, K. T. (2003). Control of voice fundamental frequency in speaking versus singing. *Journal of Acoustical Society of America*, 113(3), 1587-1593.

- Nantais, K. M., & Schellenberg, E. G. (1999). The Mozart Effect: An Artifact of Preference. *Psychological Science*, 10(4), 370-373.
- Nasir, S., & Ostry, D. M. (2008). Speech Motor Learning in Profoundly Deaf Adults. *Nature Neurosciences*, 11(10), 1217-1222.
- National Institutes of Health. (1993). Early identification of hearing impairment in infants and young children. *Bethesda MD: National Institutes of Health; NIH Consensus Statement*, 11(1), 1-24.
- Nicholas, J. G. (2000). Age differences in the use of informative/heuristic communicative functions in young children with and without hearing loss who are learning spoken language. *Journal of Speech Language Hear Research*, 43(2), 380-394.
- Nicholas, J. G., & Geers, A. E. (2006). Effects of Early Auditory Experience on the Spoken Language of Deaf Children at 3 Years of Age. *Ear Hearing*, 27(3), 286-298.
- Nicollas, R., Garell, R., Ouaknine, M., Giovanni, A., Nazarian, B., & Triglia, J.-M. (2008). Normal voice in children between 6 and 12 years of age: Database and nonlinear analysis *Journal of voice*, 22(6), 672-675.
- Nietzsche, F. (1888). *Twilight of the Idols and the Anti-Christ: Or how to philosophize with a hammer*: Newer penguin classics, edition 2003.
- Nishiyama, N., Hardie, N. A., & Shepherd, R. K. (2000). Neonatal sensorineural hearing loss affects neurone size in cat auditory midbrain. *Hearing Research*, 140(1-2), 18-22.
- Norberg, A., Melin, E., & Asplund, K. (2003). Reactions to music, touch and object presentation in the final stage of dementia: an exploratory study. *International Journal of Nursing Studies*, 40(5), 473-479.
- Oeschlin, M. S., Meyer, M., & Jäncke, L. (2010). Absolute Pitch - Functional Evidence of Speech-Relevant Auditory Acuity. *Cerebral cortex*, 20(2), 447-455.
- Ogay, S., Ploton, L., & Menuhin, Y. (1996). *Alzheimer, Communiquer grâce à la musicothérapie*: L'Harmattan.
- Ohnishi, T., Matsuda, H., Asada, T., Aruga, M., Hirakata, M., Nishikawa, M., et al. (2001). Functional Anatomy of Musical Perception in Musicians. *Cerebral Cortex*, 11(8), 754-760.
- Ott, C. G. M., Langer, N., Oeschlin, M. S., Meyer, M., & Jäncke, L. (2011). Processing of voiced and unvoiced acoustic stimuli in musicians. *Frontiers in Psychology / Auditory Cognitive Neuroscience*, 2(195), 1-10.
- Overy, K. (2003). Dyslexia and music. From timing deficits to musical intervention. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 999, 497-505.
- Overy, K., & Turner, R. (2009). The rhythmic brain. *Cortex*, 45(1), 1-3.
- Oyama, A., Arawaka, Y., Oikawa, A., Owanda, H., Oimatsu, H., Obonai, T., et al. (2003). Trial of musicokinetic therapy for traumatic patients with prolonged disturbance of

- consciousness: Two case reports. In M. Shigemori & T. Kanno (Eds.), *Proceedings of the 12th Annual Meeting of the Society for Treatment of Coma*. Tokyo: Society for the Treatment of Coma.
- Ozaki, I., Yu Jin, C., Suzuki, Y., Baba, M., Matsunaga, M., & Hashimoto, I. (2004). Rapid change of tonotopic maps in the human auditory cortex during pitch discrimination. *Clinical Neurophysiology*, 115(7), 1592-1604.
- Pacton, S., Fayol, M., & Perruchet, P. (2005). Children's implicit learning of graphotactic and morphological regularities. *Child Development*, 76(2), 324-339.
- Pantev, C., Dinnesen, A., Ross, B., Wollbrink, A., & Knief, A. (2006). Dynamics of Auditory Plasticity after Cochlear Implantation: A Longitudinal Study. *Cerebral cortex*, 16(1), 31-36.
- Pantev, C., Oostenveld, R., Engelien, A., Ross, B., Roberts, L. E., & Hoke, M. (1998). Increased auditory cortical representation in musicians. *Nature*, 392(6678), 811-814.
- Pantev, C., Roberts, L. E., Schulz, M., Engelien, A., & Ross, B. (2001). Timbre-specific enhancement of auditory cortical representation in musicians. *NeuroReport*, 12(1), 169-174.
- Pantev, C., Ross, B., Fujioka, T., Trainor, L. J., Schulte, M., & Schulz, M. (2003). Music and learning-induced cortical plasticity. *Annals of the New York Academy of Science*, 999, 438-450.
- Pantev, C., Wollbrink, A., Roberts, L. E., Engelien, A., & Lütkenhöner, B. (1999). Short-term plasticity of the human auditory cortex. *Brain Research*, 842(1), 192-199.
- Pantev, C., Wollbrink, A., Roberts, L. E., Engelien, A., & Lütkenhöner, B. (1999). Short-term plasticity of the human auditory cortex. *Brain Research*, 842, 192-199.
- Papousek, M., Papousek, H., & Haekel, M. (1987). Didactic adjustments in fathers' and mothers' speech to their three-month-old infants. *Journal of Psycholinguistic Research*, 16(5), 491-516.
- Patel, A. D. (2008). Music and the brain: Three links to language. In S. Hallam, I. Cross & M. Thaut (Eds.), *The Oxford Handbook of Music Psychology*: Oxford University Press.
- Patel, A. D. (2010). Music, biological evolution, and the brain. In M. Bailar (Ed.), *Emerging Disciplines* (pp. 91-144). Houston: TX: Rice University Press.
- Patel, A. D. (2008). *Music, Language and the Brain*. New York: Oxford University Press.
- Patel, A. D. (2011). Why would musical training benefit the neural encoding of speech? The OPERA hypothesis. *Frontiers In Psychology*, 2, 142.
- Patel, A. D., Gibson, E., Ratner, J., Besson, M., & Holcomb, P. J. (1998). Processing syntactic relations in language and music: An event-related potential study. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 10(6), 717-733.

- Patel, A. D., Iversen, J. R., Chen, Y., & Repp, B. H. (2005). The influence of metricality and modality on synchronization with a beat. *Experimental Brain Research*, 163(2), 226-238.
- Patel, A. D., Wong, M., Foxton, J., Lochy, A., & Peretz, I. (2008). Speech intonation perception deficits in musical tone deafness (congenital amusia). *Music Perception*, 25(4), 357-368.
- Pegg, J. P., Werker, J. F., & McLeod, P. J. (1992). Preference for infant-directed over adult-directed speech : Evidence from 7-week-old infants. *Infant Behavior & Development*, 15, 325-345.
- Penhune, V., Watanabe, D., & Savion-Lemieux, T. (2005). The effect of early musical training on adult motor performance: evidence for a sensitive period in motor learning. *Annals New York Academy of Science*, 1060, 265-268.
- Perani, D., Saccuman, M. C., Scifo, P., Spada, D., Andreolli, G., Rovelli, R., et al. (2010). Functional specializations for music processing in the human newborn brain. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 107(10), 4758-4763.
- Peretz, I. (2002). Brain specialization for music. *Neuroscientist*, 8(4), 372-380.
- Peretz, I. (2009). Music, language and modularity in action. In P. Rebuschat, M. Rohrmeier, J. Hawkins & I. Cross (Eds.), *Language and music as cognitive systems*: Oxford University Press.
- Peretz, I. (2006). The nature of music from a biological perspective. *Cognition*, 100, 1-32.
- Peretz, I. (2010). Towards a neurobiology of musical emotions. In P. N. Juslin & J. Sloboda (Eds.), *Handbook of Music and Emotion: Theory, research, applications*. Oxford: Oxford University Press
- Peretz, I., Champod, A.-S., & Hyde, K. (2003). Varieties of Musical Disorders The Montreal Battery of Evaluation of Amusia. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 999, 58-75.
- Peretz, I., & Coltheart, M. (2003). Modularity of music processing. *Nature Neurosciences*, 6(7), 688-691.
- Peretz, I., Gagnon, L., & Bouchard, B. (1998). Music and emotion: perceptual determinants, immediacy and isolation after brain damage. *Cognition*, 68, 111-141.
- Perrin, E., Berger-Vachon, C., Topouzkhani, A., Truy, E., & Morgon, A. (1999). Evaluation of cochlear implanted children's voices. *International Journal of Pediatric Otorhinolaryngology*, 47(2), 181-186.
- Perruchet, P., & Vinter, A. (1998). PARSER: A model for word segmentation. *Journal of Memory and Language*, 39(2), 246-263.

- Peters, F., Collette, F., Degueldre, C., Sterpenich, V., Majerus, S., & Salmon, E. (2009). The neural correlates of verbal short-term memory in Alzheimer's disease: an fMRI study. *Brain*, 132(7), 1833-1846.
- Peterson, N. R., David B. Pisoni, and Richard T. Miyamotoa. (2010). Cochlear implants and spoken language processing abilities: Review and assessment of the literature. *Restor Neurol Neurosci*, 28(1), 237-250.
- Pettito, L. A., Zatorre, R., Gauna, K., Nikelski, E. J., Dostie, D., & Evans, A. (2000). Speech-like cerebral activity in profoundly deaf people processing signed languages: Implications for the neural basis of human language. *Proc. National Academy of Science*, 97(25), 13961-13966.
- Phillips-Silver, J., Toiviainen, P., Gosselin, N., Piché, O., Nozaradan, S., Palmer, C., et al. (2011). Born to dance but beat deaf: A new form of congenital amusia. *Neuropsychologia*, 49, 961-969.
- Pisoni, D. B., & Cleary, M. (2004). Learning, memory and cognitive processes in deaf children following cochlear implantation. In F. G. Zeng, A. N. Popper & R. R. Fay (Eds.), *Springer handbook of auditory research: Auditory prosthesis, SHAR* (Vol. X, pp. 377-426). New York: Springer.
- Pisoni, D. B., & Cleary, M. (2003). Measures of Working Memory Span and Verbal Rehearsal Speed in Deaf Children after Cochlear Implantation. *Ear Hearing*, 24(1), 106S-120S.
- Pisoni, D. B., Conway, C. M., Kronenberger, W. G., Horn, D. L., Karpicke, J., & Henning, S. C. (2008). Efficacy and Effectiveness of Cochlear Implants in Deaf Children. In O. U. Press (Ed.), *Deaf Cognition* (pp. 52-101). New York.
- Plantinga, J., & Trainor, L. J. (2005). Memory for melody : Infants use a relative pitch code. *Cognition*, 98, 1-11.
- Platel, H. (in press). Ability to learn new songs in moderate to severe Alzheimer patients. *Music Perception*.
- Platel, H., Moussard, A., & Francisco, J. (en préparation). Utilisation de la musique pour faciliter l'activité de toilette chez des patients Alzheimer en institution.
- Poissant, S. F., Peters, K. A., & Robb, M. P. (2006). Acoustic and perceptual appraisal of speech production in pediatric cochlear implant users. *Journal of Pediatric Otorhinolaryngology*, 70(7), 1195-1203.
- Polley, D. B., Steinberg, E. E., & Merzenich, M. M. (2006). Perceptual learning directs cortical maps reorganizations through top-down influences. *Journal of Neuroscience*, 26(18), 4970-4982.
- Poulin-Charronnat, B., Bigand, E., & Koelsch, S. (2006). Processing of Musical Syntax Tonic versus Subdominant: An Event-related Potential Study. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 18(9), 1545-1554.

- Pulvermüller, F., Huss, M., Kherif, F., Martin, F. M. P., Hauk, O., & Shtyrov, Y. (2006). Motor cortex maps articulatory features of speech sounds. *Proc. National Academy of Science*, 103(7865-7870).
- Quittner, A. L., Smith, L. B., Osberger, M. J., Mitchell, T. V., & Katz, D. B. (1994). The impact of audition on the development of visual attention. *Psychological Science*, 5(6), 347-353.
- Racette, A., Bard, C., & Peretz, I. (2006). Making non-fluent aphasics speak: Sing along ! *Brain*, 129, 2571-2584.
- Racette, A., & Peretz, I. (2007). Learning lyrics: To sing or not to sing ? *Memory and cognition*, 35(2), 242-253.
- Raglio, A., Bellelli, G., Traficante, D., Gianotti, M., Ubezio, M. C., Gentile, S., et al. (2010). Efficacy of music therapy treatment based on cycles of sessions: a randomised controlled trial. *Aging and Mental Health*, 14(8), 900-904.
- Rainey, D. W., & Larsen, J. D. (2002). The effect of familiar melodies on initial learning and long-term memory for unconnected text. *Music Perception*, 20(2), 173-186.
- Rauscher, F. H., Shaw, G. L., & Ky, K. N. (1993). Music and spatial task performance. *Nature*, 365(6447), 661.
- Reber, A. S. (1993). *Implicit learning and tacit knowledge*. Oxford: Oxford University Press.
- Recanzone, G., Schreiner, C., & Merzenich, M. (1993). Plasticity in the frequency representation of primary auditory cortex following discrimination training in adult owl monkeys. *Journal of Neuroscience*, 13(1), 87-103.
- Repp, B. H., & Penel, A. (2004). Rhythmic movement is attracted more strongly to auditory than to visual rhythms. *Psychological research*, 68(4), 252-270.
- Resnicow, J. E., Salovey, P., & Repp, B. H. (2004). Is recognition of emotion in music performance an aspect of emotional intelligence? *Music Perception*, 22(1), 145-158.
- Riecker, A., Ackermann, H., Wildgruber, D., Dogil, G., & Grodd, W. (2000). Opposite hemispheric lateralization effects during speaking and singing at motor cortex, insula and cerebellum. *Neuroreport*, 11(9), 1997-2000.
- Rileigh, K. K., & Odom, P. B. (1972). Perception of rhythm by subjects with normal and deficient hearing. *Developmental Psychology*, 7(1), 54-61.
- Rizzolatti, G., Fadiga, L., Gallese, V., & Fogassi, L. (1996). Premotor cortex and the recognition of motor actions. *Brain Research*, 3(2), 131-141.
- Rochette, F., & Bigand, E. (2009). Long-term effects of an auditory training. *The Annals of New York Academy of Science*, 1169(1), 195-198.
- Rochette, F., & Bigand, E. (2009). Long-term effects of auditory training in severely or profoundly deaf children. *Annals of the New York Academy of Science*, 1169, 195-198.

- Rogalsky, C., Rong, F., Saberi, K., & Hickok, G. (2011). Functional anatomy of language and music perception: Temporal and structural factors investigated using functional magnetic resonance imaging. *Journal of Neurosciences*, 31(10), 3843-3852.
- Rouger, J., Fraysse, B., Deguine, O., & Barone, P. (2008). McGurk effects in cochlear-implanted deaf subjects. *Brain Research*, 1188, 89-99.
- Rouger, J., Lagleyre, S., Démonet, J.-F., Fraysse, B., Deguine, O., & Barone, P. (2012). Evolution of Crossmodal Reorganization of the Voice Area in Cochlear-Implanted Deaf Patients. *Human Brain Mapping*, 33(8), 1929-1940.
- Rouger, J., Lagleyre, S., Fraysse, B., Deneve, S., Deguine, O., & Barone, P. (2007). Evidence that cochlear implanted deaf patients are better multisensory integrators. *Proc. National Academy of Science*, 104, 7295-7300.
- Roy, M., Peretz, I., & Rainville, P. (2008). Emotional valence contributes to music-induced analgesia. *Pain*, 134, 140-147.
- Rubin, D. C. (1995). *Memory in oral traditions: The cognitive psychology of counting-out rhymes, ballads, and epics*. New York: Oxford University Press.
- Rusconi, E., Kwan, B., Giordano, B. L., Umiltà, C., & Butterworth, B. (2006). Spatial representation of pitch height: The SMARC effect. *Cognition*, 99, 113-129.
- Sacks, O. (2007). *Musicophilia*. New York: A. A. Knopf.
- Sacks, O. (2006). The power of music. *Brain*, 129(10), 2528-2532.
- Saffran, J. R., Loman, M. M., & Robertson, R. W. (2000). Infant memory for musical experiences. *Cognition*, 77, B15-B23.
- Saffran, J. R., Newport, E. L., & Aslin, R. N. (1996). Word segmentation : the Role of Distributional Cues. *Journal of Memory and Language*, 35(4), 606-621.
- Saffran, J. R., Newport, E. L., & Aslin, R. N. (1996). Word segmentation: The rôle of distributional cues. *Journal of Memory and Language*, 35, 606-621.
- Salimpoor, V. N., Benovoy, M., Larcher, K., Dagher, A., & Zatorre, R. J. (2011). Anatomically distinct dopamine release during anticipation and experience of peak emotion to music. *Nature Neurosciences*, 14(2), 257-262.
- Sambandham, M., & Schirm, V. (1995). Music as a nursing intervention for residents with Alzheimer's disease in long-term care. *Geriatric Nursing*, 16(2), 79-83.
- Samson, S., Dellacherie, D., & Platel, H. (2009). *Emotional power of music in patients with memory disorders*. Paper presented at the The Neurosciences and Music III, Montréal, Canada.
- Samson, S., Zatorre, R. J., & Ramsay, J. O. (1997). Multidimensional scaling of synthetic musical timbre; Perception of spectral and temporal characteristics. *Canadian Journal of Psychology*, 51, 307-315.

- Särkämö, T., Tervaniemi, M., Laitinen, S., Forsblom, A., Soinila, S., Mikkonen, M., et al. (2008). Music listening enhances cognitive recovery and mood after middle cerebral artery stroke. *Brain*, 131, 866-876.
- Satoh, M., & Kuzuhara, S. (2008). Training in mental singing while walking improves gait disturbance in Parkinson's disease patients. *European Neurology*, 60(5), 237-243.
- Schäffler, T., Sonntag, J., Hartnegg, K., & Fischer, B. (2004). The Effect of Practice on Low-Level Auditory Discrimination, Phonological Skills, and Spelling in Dyslexia. *Dyslexia*, 10(2), 119-130.
- Schellenberg, E. G. (2006). Long-term positive associations between music lessons and IQ. *Journal of Educational Psychology*, 98(2), 457-468.
- Schellenberg, E. G. (2004). Music lessons enhance IQ. *Psychological Science*, 15(8), 511-514.
- Schellenberg, E. G., & Hallam, S. (2005). Music listening and cognitive abilities in 10 and 11 year olds: The Blur effect. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1060(202-209).
- Schellenberg, E. G., Nakata, T., Hunter, P. G., & Tamoto, S. (2007). Exposure to music and cognitive performance: Tests of children and adults. *Psychology of Music*, 35(1), 5-19.
- Schlaug, G. (2003). The brain of musicians. In I. Peretz & R. J. Zatorre (Eds.), *The Cognitive Neuroscience of Music* (pp. 366–381). New York: Oxford University Press.
- Schlaug, G., Jäncke, L., Huang, Y., & Steinmetz, H. (1995). In vivo evidence of structural brain asymmetry in musicians. *Science*, 3(267(5198)), 699-701.
- Schlaug, G., Norton, A., Overy, K., & Winner, E. (2005). Effects of Music Training on the Child's Brain and Cognitive Development. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1060, 219-230.
- Schmiedek, F., Lövdén, M., & Lindenberger, U. (2010). Hundred days of cognitive training enhance broad cognitive abilities in adulthood: Findings from the COGITO study. *Frontiers in Aging Neuroscience*, 2, 1-10.
- Schmithorst, V., & Holland, S. K. (2004). The effect of musical training on the neural correlates of math processing : a functional magnetic resonance imaging study in humans. *Neuroscience Letters*, 354, 193-196.
- Schneider, P., Scherg, M., Dosch, H. G., Specht, H. J., Gutschalk, A., & Rupp, A. (2002). Morphology of Heschl's gyrus reflects enhanced activation in the auditory cortex of musicians. *Nature Neurosciences*, 5(7), 688-694.
- Schneider, P., Sluming, V., Roberts, N., Scherg, M., Goebel, R., Specht, H. J., et al. (2005). Structural and functional asymmetry of lateral Heschl's gyrus reflects pitch perception preference. *Nature Neurosciences*, 8(9), 1242-1247.

- Schneider, S., Schönle, P. W., Altenmüller, E., & Münte, T. F. (2007). Using musical instruments to improve motor skill recovery following a stroke. *Journal of Neurology*, 254(10), 1339-1346.
- Schön, D., Boyer, M., Moreno, S., Besson, M., Peretz, I., & Kolinski, R. (2008). Songs as an aid for language acquisition. *Cognition*, 106(2), 975-983.
- Schön, D., Magne, C., & Besson, M. (2004). The music of speech : Music facilitates pitch processing in language. *Psychophysiology*, 41(3), 341-349.
- Schulkind, M. D., Hennis, L. K., & Rubin, D. C. (1999). Music, emotion, and autobiographical memory: They're playing your song. *Memory and Cognition*, 27(6), 948-955.
- Scientific Learning Corporation. (1998). Fast ForWord-Language [Computer Software]. Berkeley, CA
- Seifert, E., Oswald, M., Bruns, U., Vischer, M., Kompis, M., & Haeusler, R. (2002). Changes of voice and articulation in children with cochlear implants. *International Journal of Pediatric Otorhinolaryngology*, 66(2), 115-123.
- Sevy, A. B. G., Bortfeld, H., Huppert, T. J., Beauchamp, M. S., Tonini, R. E., & Oghalai, J. S. (2010). Neuroimaging with near-infrared spectroscopy demonstrates speech-evoked activity in the auditory cortex of deaf children following cochlear implantation. *Hearing Research*, 270(1-2), 39-47.
- Shabanloei, R., Golchin, M., Esfahani, A., Dolatkhah, R., & Rasouljan, M. (2010). Effects of music therapy on pain and anxiety in patients undergoing bone marrow biopsy and aspiration. *AORN Journal*, 91(6), 746-751.
- Shahin, A. J., Roberts, L., E., , Pantev, C., Trainor, L. J., & Ross, B. (2005). Modulation of P2 auditory-evoked responses by the spectral complexity of musical sounds. *NeuroReport*, 16(16), 1781-1785.
- Shahin, A. J., Roberts, L., E., Pantev, C., Aziz, M.,. (2007). Enhanced anterior-temporal processing for complex tones in musicians. *Clinical Neurophysiology*, 118(1), 209-220.
- Sharma, A., Dorman, M. F., & Spahr, A. J. (2002a). A sensitive period for the development of the central auditory system in children with cochlear implants; implications for age of implantation. *Ear Hearing*, 23(6), 532-539.
- Shenfield, T., Trehub, S., & Nakata, T. (2003). Maternal singing modulates infant arousal. *Psychology of Music*, 31(4), 365-375.
- Shin, M.-S., Kim, S.-K., Kim, S.-S., Park, M.-H., Kim, C.-S., & Oh, S.-H. (2007). Comparison of Cognitive Function in Deaf Children Between Before and After Cochlear Implant. *Ear Hearing*, 28(2), 22S-28S.
- Siedliecki, S. L., & Good, M. (2006). Effect of music on power, pain, depression and disability. *Journal of Advanced Nursing*, 54, 553-562.

- Simmons-Stern, N. R., Budson, A. E., & Ally, B. A. (2010). Music as a memory enhancer in patients with Alzheimer's disease. *Neuropsychologia*, 48(10), 3164-3167.
- Simonyan, K., & Horwitz, B. (2011). Laryngeal Motor Cortex and Control of Speech in Humans. *Neuroscientist*, 17(2), 197-208.
- Simonyan, K., Ostuni, J., Ludlow, C. L., & Horwitz, B. (2009). Functional But Not Structural Networks of the Human Laryngeal Motor Cortex Show Left Hemispheric Lateralization during Syllable But Not Breathing Production. *Journal of Neuroscience*, 29(47), 14912-14923.
- Sitoh, Y. Y., & Tien, R. D. (1997). The limbic system. An overview of the anatomy and its development. *Neuroimaging clinics of North America*, 7(1), 1-10.
- Slevc, L. R., & Miyake, A. (2006). Individual differences in second-language proficiency: Does musical ability matter? *Psychological Science*, 17(8), 675-681.
- Smith, L. B., Quittner, A. L., Osberger, M. J., & Miyamoto, R. T. (1998). Audition and Visual Attention: The Developmental Trajectory in Deaf and Hearing Populations. *Developmental Psychology*, 34(5), 840-850.
- Smith, R., Bale, J., & White, K. (2005). Sensorineural hearing loss in children. *The Lancet*, 365(9462), 879-890.
- Solé, C., Mercadal-Brotons, M., Gallego, S., & Riera, M. (2010). Contributions of music to aging adults' quality of life. *Journal of Music Therapy*, 47(3), 264-281.
- Sorensen, D., Horii, Y., & Leonard, R. (1980). Effects of laryngeal anesthesia on voice fundamental frequency perturbation. *journal of Speech Language Hear Research*, 23(2), 274-283.
- Soto, D., Funes, M. J., Guzmán-García, A., Warbrick, T., Rotshtein, P., & Humphreys, G. W. (2009). Pleasant music overcomes the loss of awareness in patients with visual neglect. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 106(14), 6011-6016.
- Sparks, R. W., & Holland, A. L. (1976). Method: Melodic Intonation Therapy for Aphasia. *The Journal of Speech and Hearing Disorders*, 41(3), 287-297.
- Spencer, P. E. (2004). Individual Differences in Language Performance after Cochlear Implantation at One to Three Years of Age: Child, Family, and Linguistic Factors. *Journal of Deaf Studies and Deaf Education*, 9(4), 395-412.
- Spilka, M. J., Steele, C. J., & Penhune, V. B. (2010). Gesture imitation in musicians and non-musicians. *Experimental Brain Research*, 204(4), 549-558.
- Steele, K., Dalla Bella, S., Peretz, I., Dunlop, T., Dawe, L., Humphrey, G., et al. (1999). Prelude or requiem for "The Mozart effect"? *Nature*, 400, 827-828.
- Styns, F., Van Noorden, L., Moelants, D., & Leman, M. (2007). Walking on music. *Human Movement Science*, 26, 769-785.

- Svansdottir, H. B., & Snaedal, J. (2006). Music therapy in moderate and severe dementia of Alzheimer's type: a case-control study. *International Psychogeriatrics*, 18(4), 613-621.
- Swingley, D., & Aslin, R. N. (2000). Spoken words recognition and lexical representation in very young children. *Cognition*, 76, 147-166.
- Tait, M., Raeve, L. D., & Nikolopoulos, T. P. (2007). Deaf children with cochlear implants before the age of 1 year : Comparison of preverbal communication with normally hearing children. *International Journal of Otorhinolaryngology*, 71(10), 1605-1611.
- Tallal, P. (1990). Fine-grained discrimination deficits in language-learning impaired children are specific neither to the auditory modality nor to speech perception. *Journal of Speech Language Hear Research*, 33(3), 616-619.
- Tallal, P., Miller, S. L., Bedi, G., Byma, G., Wang, X., Nagarajan, S. S., et al. (1996). Language comprehension in language-learning impaired children improved with acoustically modified speech. *Science*, 271(5245), 81-84.
- Talwar, N., Crawford, M. J., Maratos, A., Nur, U., McDermott, O., & Procter, S. (2006). Music therapy for in-patients with schizophrenia: exploratory randomised controlled trial. *The British Journal of Psychiatry*, 189, 405-409.
- Temple, E., Deutsch, G. K., Poldrack, R. A., Miller, S. L., Tallal, P., Merzenich, M. M., et al. (2003). Neural deficits in children with dyslexia ameliorated by behavioral remediation: evidence from functional MRI. *PNAS*, 100(5), 2860-2865.
- Terwogt, M. M., & Van Grinsven, F. (1988). Recognition of emotions in music by children and adults. *Perceptual and Motor Skills*, 67(3), 697-698.
- Terwogt, M. M., & Van Grisven, F. (1991). Musical expression of moodstates. *Psychology of Music*, 19(2), 99-109.
- Thaut, M. H., McIntosh, G. C., Rice, R. R., Miller, R. A., Rathbun, J., & Brault, J. M. (1996). Rhythmic auditory stimulation in gait training for Parkinson's disease patients. *Movement disorders*, 11(2), 193-200.
- Thaut, M. H., McIntosh, K. W., McIntosh, G. C., & Hoemberg, V. (2001). Auditory rhythmicity enhances movement and speech motor control in patients with Parkinson's disease. *Functional neurology*, 16(2), 163-172.
- Thaut, M. H., Peterson, D. A., & McIntosh, G. C. (2005). Temporal entrainment of cognitive functions: Musical mnemonics induce brain plasticity and oscillatory synchrony in neural networks underlying memory. *Annals of the New York Academy of Science*, 1060, 243-254.
- Thompson, W. F., Schellenberg, E. G., & Husain, G. (2001). Arousal, mood, and the Mozart effect. *Psychological Science*, 12, 248-251.
- Thompson, W. F., Schellenberg, E. G., & Husain, G. (2004). Decoding speech prosody: Do music lessons help? *Emotion*, 4(1), 46-64.

- Thompson, W. F., Schellengerg, G. E., & Husain, G. (2003). Perceiving prosody in speech. Effects of music lessons. *Annals of the New York Academy of Science*, 999, 530-532.
- Tierney, T. S., & Moore, D. R. (1997). Naturally occurring neuron death during postnatal development of the gerbil ventral cochlear nucleus begins at the onset of hearing. *Journal of Comparative Neurology*, 387(3), 421-429.
- Tillmann, B., Bharucha, J. J., & Bigand, E. (2000). Implicit Learning of Tonality : a Self-Organizing approach. *Psychological Review*, 107(4), 885-913.
- Tillmann, B., Koelsch, S., Escoffier, N., Bigand, E., Lalitte, P., Friederici, A. D., et al. (2006). Cognitive priming in sung and instrumental music: Activation of inferior frontal cortex. *NeuroImage*, 31(4), 1771-1782.
- Tobey, E. A., Reckart, D., Buckley, K., & Geers, A. E. (2004). Mode of Communication and Classroom Placement Impact on Speech Intelligibility. *ARCH OTOLARYNGOL HEAD NECK SURG*, 130(5), 639-643.
- Tomasello, M., Carpenter, M., Call, J., Behne, T., & Mol, H. (2005). Understanding and sharing intentions: The origins of cultural cognition. *Behavioral and Brain Sciences*, 28(5), 675-691.
- Tomblin, B., Barker, B. A., Spencer, L., Zhang, X., & Gantz, B. J. (2005). The effect of age at cochlear implant initial stimulation on expressive language growth in infants and toddlers. *Journal of Speech Language Hear Research*, 48(4), 853-867.
- Tourville, J. A., Reilly, K. J., & Guenther, F., H. (2008). Neural mechanisms underlying auditory feedback control of speech. *NeuroImage* 39, 1429-1443.
- Trainor, L. J. (2008). Science & music: the neural roots of music. *Nature*, 453(7195), 598-599.
- Trainor, L. J., & Heinmiller, B. M. (1998). The development of evaluative responses to music : Infants prefer to listen to consonant over dissonance. *Infant Behavior & Development*, 21, 77-88.
- Transler, C., Leybaert, J., & Gombert, E. (1999). Do deaf children use phonological syllables as reading units? *Journal of Deaf Studies and Deaf Education*, 4(2), 124-143.
- Trehub, S. (2005). Developmental and Applied Perspectives on Music, Introduction. *Annals of New York Academy of Sciences*, 1060, 198-205.
- Trehub, S. (2003). The developmental origins of musicality. *Nature Neurosciences*, 6(7), 669-673.
- Trehub, S. (2008). *Music in the lives of Deaf Children*. Paper presented at the Neuromusic III, Montreal.
- Trehub, S., & Hannon, E. E. (2006). Infant music perception: Domain-general or domain-specific mechanisms? *Cognition*, 100(1), 73-99.
- Trehub, S., & Trainor, L. J. (1998). *Singing to infants: Lullabies and play songs* (Vol. 12).

- Trehub, S. E. (2003). The developmental origins of musicality. *Nature Neuroscience*, 6(7), 669-673.
- Trehub, S. E., & Schellenberg, E. G. (1995). Music: Its relevance to infants. *Annals of Child Development*, 11, 1-24.
- Trehub, S. E., Schneider, B. A., & Henderson, J. L. (1995). Gap detection in childhood. *Journal of Acoustical Society of America*, 98, 2532-2541.
- Treurnicht-Naylor, K., Kingsnorth, S., Lamont, A., McKeever, P., & Macarthur, C. (2011). The effectiveness of music in pediatric healthcare: A systematic review of randomized controlled trials. *Evidence-based Complementary and Alternative Medicine*.
- Tsao, Y. C., & Weismer, G. (1997). Interspeaker variation in habitual speaking rate: evidence for a neuromuscular component. *J. Speech Lang. Hear. Res*, 40, 858-866.
- Tucci, D. L., Born, D. E., & Rubel, E. W. (1987). Changes in spontaneous activity and CNS morphology associated with conductive and sensorineural hearing loss in chickens. *Annals of Otology Rhinology and Laryngology*, 96, 343-350.
- Ubrig, M. T., Valeria, G.-G. M., Weber, R., Moreira Menezes, M. H., Nemr, N. K., Tsuji, D., Hiroshi, et al. (2011). Voice Analysis of Postlingually Deaf Adults Pre- and Postcochlear Implantation *Journal of voice*, 25(6), 692-699.
- Ukkola-Vuoti, L., Oikkonen, J., Onkamo, P., Karma, K., Raijas, P., & Järvelä, I. (2009). Musical aptitude is associated with AVRP1A-Haplotypes. *PLoS One*, 4(5), 1-8.
- Van der Winckel, A., Feys, H., De Weerd, W., & Dom, R. (2004). Cognitive and behavioral effects of music-based exercises in patients with dementia. *Clinical rehabilitation*, 18, 253-260.
- Vieillard, S., Peretz, I., Gosselin, N., Khalfa, S., Gagnon, L., & Bouchard, B. (2008). Happy, sad, scary and peaceful musical excerpts for research on emotions. *Cognition and Emotion*, 22(4), 720-752.
- Vigneau, M., Beaucois, V., Hervé, P. Y., Duffau, H., Crivello, F., Houdé, O., et al. (2006). Meta-analyzing left hemisphere language areas: Phonology, semantics, and sentence processing. *Neuroimage*, 30(4), 1414-1432.
- Vinter, S. (2005). L'acquisition du langage oral par l'enfant sourd. In Solal (Ed.), *Précis d'audiologie et de déglutition* (pp. 271-292). Marseille.
- Viole, B. (2005). L'enfant sourd: guidance parentale. In Solal (Ed.), *Précis d'audiophonologie et de déglutition* (pp. 319-328). Marseille.
- Vongpaisal, T., Trehub, S., & Schellenberg, E. G. (2006). Song recognition by children and adolescents with cochlear implants. *Journal of Speech Language Hear Research*, 49(5), 1091-1032.
- Vongpaisal, T., Trehub, S., Schellenberg, E. G., & Papsin, B. C. (2004). Music recognition by children with cochlear implants. *International Congress Series*, 1273, 193-196.

- Wallace, W. T. (1994). Memory for music: Effect of melody on recall of text. *Journal of Experimental Psychology. Learning, Memory, and Cognition* 20, 1471-1485.
- Wan, C. Y., Demaine, K., Zypse, L., Norton, A., & Schlaug, G. (2010). From music making to speaking : Engaging the mirror neurons system in autism. *Brain Research Bulletin*, 82, 161-168.
- Wan, C. Y., Demaine, K., Zypse, L., Norton, A., & Schlaug, G. (2010). From music making to speaking: Engaging the mirror neurons system in autism. *Brain Research Bulletin*, 82(3-4), 161-168.
- Wan, C. Y., & Schlaug, G. (2010). Music making as a tool for promoting brain plasticity across the life span. *Neuroscientist*, 16(5), 566-577.
- Wang, Y., Kuhl, P. K., Chen, C., & Dong, Q. (2009). Sustained and transient language control in the bilingual brain. *Neuroimage*, 47(1), 414-422.
- Warren, J. D., Wise, R. J. S., & Warren, J. E. (2005). Sounds do-able: Auditory-motor transformations and the posterior temporal plane. *Trends in Cognitive Sciences*, 28, 636-643.
- Watanabe, D., Savion-Lemieux, T., & Penhune, V. B. (2007). The effects of early musical training on adult motor performance: Evidence for a sensitive period in motor learning. *Experimental Brain Research*, 176, 332-340.
- Wheeler, B., Shiflett, S., & Nayak, N. (2003). Effects of number of sessions and group or individual music therapy on the mood and behaviour of people who have had strokes or traumatic brain injury. *Nordic Journal of Music Therapy*, 12(2), 139-151.
- Wilson, S. J., Parsons, K., & Reutens, D. C. (2006). Preserved singing in aphasia: A case study of the efficacy of melodic intonation therapy. *Music Perception*, 24(1), 23-36.
- Wilson, S. M., Saygin, A. P., Sereno, M. I., & Iacobini, M. (2004). Listening to speech activated motor areas involved in speech perception. *Nature Neurosciences*, 7(701-702).
- Wise, G. W., Hartmann, D. J., & Fisher, B. J. (1992). Exploration of the relationship between choral singing and successful aging. *Psychological Reports*, 70(3 Pt 2), 1175-1183.
- Witvliet, C. V. O., & Vrana, S. R. (2007). Play it again Sam: Repeated exposure to emotionally evocative music polarises liking and smiling responses, and influences other affective reports, facial EMG, and heart rate. *Cognition and Emotion*, 21(1), 3-25.
- Wollmer, M., Snyder, R. L., Leake, P. A., Beitel, R. E., Moore, C. M., & Rebscher, S. J. (1999). Temporal properties of chronic cochlear electrical stimulation determine temporal resolution of neurons in cat inferior colliculus. *Journal of Neurophysiology*, 82(6), 2883-2902.
- Wong, P., Perrachione, T. K., & Margulis, E. H. (2009a). Effects of asymmetric cultural experiences on the auditory pathway evidence from music. *Neurosciences and music III: disorders and plasticity. Ann. N. Y. Acad. Sci.*, 1169, 157-163.

- Wong, P., Skoe, E., Russo, N., Dees, T., & Kraus, N. (2007). Musical experience shapes human brainstem encoding of linguistic pitch patterns. *Nature Neurosciences*, 10, 420-422.
- Wong, P., Warrier, C., Penhune, V., Roy, A. K., Saddehh, A., Parrish, T., et al. (2008). Volume of left Heschl's Gyrus and Linguistic Pitch Learning. *Cerebral cortex*, 18(4), 828-836.
- Wong, P. C. M., Skoe, E., Russo, N. M., Dees, T., & Kraus, N. (2007). Musical experience shapes human brainstem encoding of linguistic pitch patterns. *Nature Neuroscience*, 10, 420-422.
- Wright, B. A., & Sabin, A. T. (2007). Perceptual learning : how much daily training is enough? . *Experimental Brain Research*, 180(4), 727-736.
- Wu, J.-L., Yang, H.-M., Lin, Y.-H., & Fu, Q. J. (2007). Effects of Computer-Assisted Speech training on Mandarin-Speaking Hearing-Impaired Children. *Audiology & Neurotology*, 12(5), 307-312.
- Xu, L., Zhou, N., Chen, X., Li, Y., Schultz, H. M., Zhao, X., et al. (2009). Vocal singing by prelingually-deafened children with cochlear implants. *Hearing Research*, 255(1-2), 129-134.
- Yucel, E., Sennaroglu, G., & Belgin, E. (2009). The family oriented musical training for children with cochlear implants: Speech and musical perception results of two year follow up. *International Journal of Pediatric Otorhinolaryngology*, 73(7), 1043-1052.
- Zatorre, R. J., Chen, J. L., & Penhune, V. B. (2007). When the brain plays music: Auditory-motor interactions in music perception and production. *Nature Reviews. Neuroscience*, 8(7), 547-558.
- Zendel, B. R., & Alain, C. (2008). Concurrent sound segregation is enhanced in musicians. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 21(8), 1488–1498.
- Zendel, B. R., & Alain, C. (2011). Musicians experience less age-related decline in central auditory processing. *Psychology and Aging*.
- Zheng, Z. Z., Munhall, K. G., & Johnsrude, I. S. (2010). Functional overlap between regions involved in speech perception and in monitoring one's own voice during speech production. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 22(8), 1770-1781.

ANNEXES

Annexe1 : Test de discrimination phonétique

Epreuve 1

Item		
1	la	la
2	la	lɛ
3	li	li
4	ly	ly
5	lo	lə
6	lu	le
7	lœ	lo
8	lu	lo
9	lɔ	lɔ
10	lɛ	lɛ
11	li	ly
12	le	le

Epreuve 2

Item		
1	ta	pa
2	la	ra
3	ma	ma
4	va	ba
5	za	ja
6	pa	pa
7	fa	fa
8	ma	na
9	sa	sa
10	da	ga
11	ka	ta
12	sa	ja

Epreuve 3

Item		
1	ma	ba
2	sa	za
3	ga	ga
4	va	ba
5	za	ja
6	ba	pa
7	fumo	fumo
8	vama	vama
9	talik	talig
10	felut	felud
11	laka	laka
12	fabo	fapo

Annexe2 : Questionnaire

Prénom :
Initiale Nom :
Date de naissance :
Code Groupe :

REGULARITE DE L'ENTRAÎNEMENT

Votre enfant a-t-il pu venir régulièrement aux séances d'entraînement auditif

Oui

Non

Si non, quelle en la raison principale ?

Maladie	Oui	Non
---------	-----	-----

Transport (distance	Oui	Non
---------------------	-----	-----

Refus (opposition de l'enfant	Oui	Non
-------------------------------	-----	-----

Autre : précisez

COMPORTEMENT

Selon vous, votre enfant a-t-il apprécié l'entraînement auditif ?

Pas du tout	Très peu	Moyen	Plutôt	Beaucoup
-------------	----------	-------	--------	----------

Selon vous, prête-t-il plus attention aux bruits maintenant ?

Pareil qu'avant	Un peu plus qu'avant	Beaucoup plus qu'avant
-----------------	----------------------	------------------------

LANGAGE

Dans quel(s) domaines(s) les progrès de votre enfants sont les plus remarquables ?

Attention auditive	Pas du tout	Un peu	Beaucoup
--------------------	-------------	--------	----------

Mémoire	Pas du tout	Un peu	Beaucoup
---------	-------------	--------	----------

Prise de parole	Pas du tout	Un peu	Beaucoup
-----------------	-------------	--------	----------

Intelligibilité	Pas du tout	Un peu	Beaucoup
-----------------	-------------	--------	----------

Vocabulaire	Pas du tout	Un peu	Beaucoup
-------------	-------------	--------	----------

Construction des phrases	Pas du tout	Un peu	Beaucoup
--------------------------	-------------	--------	----------

Lecture	Pas du tout	Un peu	Beaucoup
---------	-------------	--------	----------

Les enseignants vous ont-ils signalé une évolution chez votre enfant ?

Oui

Non

Si oui, dans quel domaine ?

L'orthophoniste qui suit habituellement votre enfant, a-t-elle signalé une évolution ?

Oui

Non

Si oui, dans quel domaine ?

Merci pour votre participation.

Annexe3: Test de dénommination





