

Université de Montréal

Fonctionnement auditif central d'enfants ayant une surdité

Par

Amineh Koravand

École d'orthophonie et d'audiologie
Faculté de médecine

Thèse présentée à la Faculté des études supérieures
en vue de l'obtention du grade de Ph.D.
en Sciences biomédicales
option audiologie

Août 2011
© Amineh Koravand, 2011

Université de Montréal
Faculté des études supérieures

Cette thèse intitulée :

Fonctionnement auditif central d'enfants ayant une surdité

présentée par :

Amineh Koravand

a été évaluée par un jury composé des personnes suivantes :

Sylvie Hébert, président-rapporteur

Benoît Jutras, directeur de recherche

Tony Leroux, membre du jury

Claude Alain, examinateur externe

Douglas Shiller, représentant du doyen de la FES

Résumé

La présente recherche explore les conséquences d'une perte auditive périphérique sur le traitement de l'information auditive. Des études ont montré que les enfants malentendants ont de la difficulté à effectuer des tâches d'écoute complexes. De plus, des études menées auprès d'adultes malentendants montrent que l'activité corticale associée à l'écoute de stimuli auditifs est différente de celle d'adultes entendants. Cependant, les résultats de ces études ne mettent pas en lumière la nature des difficultés de traitement de l'information auditive des enfants malentendants. Cette recherche examine donc cet aspect en ayant recours à des mesures comportementales et neurophysiologiques.

Les données ont été recueillies auprès de 40 enfants âgés de 9 à 12 ans : 12 enfants ayant une surdité neurosensorielle, 12 enfants ayant trouble de traitement auditif et 16 enfants normo-entendants. Les enfants ont reproduit dans l'ordre des séquences de deux, trois et cinq stimuli verbaux ou non verbaux avec un intervalle interstimuli de 425 ms. Les enfants ont également reproduit des séquences de deux stimuli avec un intervalle interstimuli de 20 et 1000 ms. Enfin, les enfants ont été soumis à des mesures neurophysiologiques à partir de potentiels évoqués auditifs de latence longue et de négativité de discordance avec des paires de stimuli verbaux et non verbaux.

Les résultats obtenus permettent d'avancer que les participants du groupe d'enfants malentendants ont un trouble spécifique de traitement auditif. En effet, les

résultats de la tâche comportementale montrent que les enfants malentendants ont de la difficulté à traiter des séquences de stimuli lorsque ceux-ci sont verbaux et acoustiquement similaires. Quant aux données neurophysiologiques, les résultats ont démontré que l'amplitude de l'onde tardive N2 était réduite chez les enfants malentendants comparativement à celle de l'onde N2 des deux autres groupes d'enfants. Cette onde pourrait être considérée comme étant un marqueur neurophysiologique reflétant l'influence d'une perte auditive sur le traitement auditif central. De plus, l'amplitude de l'onde de négativité de discordance pourrait être aussi un marqueur pour distinguer les enfants malentendants de ceux ayant un trouble de traitement auditif.

Mots-clés : organisation séquentielle auditive, potentiels évoqués auditifs de latence longue, négativité de discordance, enfants malentendants d'âge scolaire

Abstract

The present research explores the effects of peripheral hearing loss on central auditory processing. Previous studies showed that children with hearing loss have significant difficulties in performing complex listening tasks. Moreover, studies of adults with hearing loss revealed that cortical activity related to listening to acoustic stimuli differed from that of adults without hearing loss. However, results of these studies do not clarify the nature of the difficulties in processing auditory information among children with hearing loss. The present research examines this issue using behavioural and neurophysiological measures.

Behavioural and neurophysiological data were collected with forty 9- to 12-year-old children: 12 with hearing loss, 12 with central auditory processing disorder (CAPD) and 16 with normal hearing. Children repeated, in order, two, three, and five verbal and nonverbal stimuli with an interstimulus interval of 425 ms. They also repeated sequences of two stimuli with an interstimulus interval of 20 or 1000 ms. Finally, late-latency auditory evoked potentials and mismatch responses were recorded in the participants using pairs of verbal and nonverbal stimuli.

Results suggest that children with hearing loss have a specific central auditory processing disorder. Results of the behavioural task showed that children with hearing loss had difficulty processing sequences of stimuli when the stimuli were verbal as well as similar and complex acoustically. As for the neurophysiological data, results indicated that the amplitude of late N2 waveform was smaller in children with hearing

loss than in the other two groups of children. The N2 waveform has the potential to be a neurophysiological marker revealing the influence of hearing loss on central auditory processing. Moreover, the amplitude of the mismatch response could be another marker to distinguish the children with hearing loss from those with central auditory processing disorder.

Keywords : Auditory sequential organization, late-latency auditory evoked potentials, mismatch responses, school-aged children with hearing loss

Table des matières

| | |
|---|-------|
| Résumé..... | iii |
| Abstract..... | v |
| Table des matières..... | vii |
| Liste des tableaux..... | xiii |
| Liste des figures..... | xix |
| Listes des sigles, acronymes et abréviations..... | xxxix |
| Remerciements..... | xxxix |
| Dédicacions..... | xxxv |
| Chapitre 1..... | 1 |
| 1. Introduction..... | 1 |
| 1.1. Problématique..... | 2 |
| 1.2. Organisation de la thèse..... | 4 |
| 1.3. Inventaire des connaissances..... | 6 |
| 1.3.1. Troubles auditifs..... | 6 |
| 1.3.1.1. Conséquences des troubles auditifs..... | 7 |
| Chapitre 2..... | 10 |
| 2. Capacité auditive d'ordre temporel chez les enfants malentendants..... | 10 |
| 2.1. Organisation séquentielle auditive..... | 11 |
| 2.1.1. Durée du stimulus et intervalle interstimuli..... | 11 |
| 2.1.2. Perception de l'ordre temporel et mémoire à court terme.... | 12 |
| 2.1.3. Organisation séquentielle auditive et surdité..... | 13 |
| 2.2. Méthodologie..... | 17 |
| 2.2.1. Participants..... | 17 |
| 2.2.1.1. Critères d'inclusion généraux | 18 |
| 2.2.2. Matériel | 24 |
| 2.2.2.1. Stimuli..... | 24 |
| 2.2.2.1.1. Stimuli verbaux..... | 24 |
| 2.2.2.1.2. Stimuli non verbaux..... | 26 |
| 2.2.3.  quipements..... | 28 |

| | |
|---|----|
| 2.2.4. Déroulement | 28 |
| 2.3. Article 1 | 31 |
| Abstract..... | 33 |
| Introduction..... | 34 |
| Materials and Methods | 36 |
| Participants | 36 |
| Materials and Equipment..... | 37 |
| Procedure..... | 38 |
| 1. Discrimination test..... | 39 |
| 2. Identification test..... | 39 |
| 3. Auditory sequential organization (ASO) test..... | 40 |
| Results..... | 40 |
| Raven's Colored Progressive Matrices..... | 40 |
| Discrimination and identification tests..... | 40 |
| Auditory sequential organization test..... | 41 |
| Number of elements per sequence..... | 41 |
| Interstimulus interval duration..... | 43 |
| Discussion..... | 44 |
| Conclusion..... | 47 |
| Acknowledgments..... | 49 |
| References..... | 50 |
| Table Captions..... | 55 |
| Figure Captions..... | 56 |
| Chapitre 3..... | 59 |
| 3. Réponses neurophysiologiques à des stimulations auditives chez les enfants malentendants..... | 59 |
| 3.1. Fonctionnement du système auditif central et surdité..... | 60 |
| 3.1.1. Potentiels évoqués auditifs..... | 60 |
| 3.1.2. Potentiels évoqués auditifs de latence longue et surdité | 65 |
| 3.1.3. Potentiels évoqués auditifs de latence longue et trouble de traitement auditif | 69 |

| | |
|---|-----|
| 3.2. Méthodologie..... | 73 |
| 3.2.1. Participants..... | 73 |
| 3.2.2. Matériel | 73 |
| 3.2.2.1. Stimuli..... | 73 |
| 3.2.3. Équipements..... | 76 |
| 3.2.3.1.Électrophysiologie à haute densité..... | 76 |
| 3.2.4. Déroulement | 77 |
| 3.2.4.1. Préparation des participants..... | 77 |
| 3.2.4.2. Paramètres de présentation de stimuli..... | 79 |
| 3.3. Article 2..... | 80 |
| Abstract..... | 82 |
| Introduction..... | 83 |
| Experimental Procedures..... | 85 |
| Participants | 85 |
| Materials..... | 86 |
| Stimuli..... | 86 |
| Electrophysiological recordings..... | 87 |
| Procedure..... | 88 |
| Data analysis | 88 |
| Results..... | 90 |
| Cortical auditory waves P1 and N2..... | 91 |
| Latency..... | 91 |
| Amplitude..... | 92 |
| Cortical distribution..... | 93 |
| Mismatch responses (MMRs)..... | 93 |
| Latency..... | 93 |
| Amplitude..... | 93 |
| Discussion..... | 94 |
| Conclusions..... | 99 |
| Acknowledgments..... | 100 |
| References..... | 101 |

| | |
|--|-----|
| Table Captions..... | 108 |
| Figure Captions..... | 111 |
| 3.4. Résultats complémentaires..... | 117 |
| 3.4.1. Résultats complémentaires à l'étude 2..... | 118 |
| 3.4.1.1. Présence des ondes principales de latence longue..... | 118 |
| 3.4.1.2. Corrélation entre l'âge des enfants et la latence et l'amplitude de P1 et N2..... | 120 |
| 3.4.1.2.1. Trois groupes | 121 |
| 3.4.1.2.2. Enfants malentendants..... | 121 |
| 3.4.1.3. Latéralisation du traitement de l'information auditive..... | 122 |
| 3.4.1.4. Distribution de l'activité corticale | 134 |
| 3.4.1.4.1. Onde P1..... | 134 |
| 3.4.1.4.2. Comparaison de la distribution corticale de N2 entre les enfants malentendants et normo-entendants..... | 136 |
| 3.4.1.4.3. Comparaison de la distribution corticale de N2 entre les enfants malentendants et TTA | 136 |
| 3.4.1.5. Analyse de données provenant des stimuli rares.... | 139 |
| 3.4.2. Croisement entre les résultats des deux études..... | 144 |
| 3.4.2.1. Relation entre la discrimination active et passive... | 144 |
| 3.4.2.2. Corrélation entre la tâche d'organisation séquentielle auditive et les caractéristiques de l'onde N2..... | 146 |
| 3.4.2.2.1. Analyse de trois groupes | 147 |
| 3.4.2.2.2. Analyse des enfants malentendants..... | 149 |
| Chapitre 4..... | 154 |
| 4. Discussion générale..... | 154 |
| 4.1. Trouble spécifique du traitement auditif chez les enfants | |

| | |
|--|--------|
| malentendants..... | 155 |
| 4.1.1. Mesures comportementales..... | 155 |
| 4.1.1.1. Âge lors de l'expérimentation..... | 160 |
| 4.1.1.2. Degré de surdité..... | 161 |
| 4.1.1.3. Durée d'utilisation de l'appareillage auditif..... | 162 |
| 4.1.2. Mesures électrophysiologiques..... | 165 |
| 4.1.2.1. Âge lors de l'enregistrement électrophysiologique. | 171 |
| 4.1.2.2. Degré de surdité..... | 175 |
| 4.1.2.3. Âge de l'appareillage..... | 176 |
| 4.1.3. Relation entre les mesures comportementales et | |
| électrophysiologiques..... | 179 |
| 4.1.3.1. Relation entre les tâches discrimination auditive | |
| active et passive..... | 180 |
| 4.1.3.2. Relation entre le tâche d'OSA et l'amplitude et la | |
| latence de N2..... | 181 |
| 4.1.3.3. Résultats congruents provenant des deux | |
| études..... | 182 |
| 4.2. Avenues de recherche | 183 |
| 4.3. Implications cliniques..... | 184 |
| 4.4. Conclusion | 195 |
| Bibliographie..... | 197 |
| Annexes | i |
| Annexes A – Peripheral hearing loss and auditory temporal-ordering ability in | |
| children..... | ii |
| Annexes B – Cortical auditory evoked potentials in children with a hearing loss: | |
| A pilot study..... | xxxix |
| Annexes C –Données individuelles reliées aux ondes N1 et P2..... | lxxiii |
| Annexes D – Positionnement des 128 électrodes du bonnet de Geodesic Sensor | |
| Net..... | lxxii |
| Annexes E – Lettres d'information et formulaire de consentement pour chacun | |
| des groupes..... | lxxiv |

Annexes F– Formulaire de dépistage pré-évaluation..... xcvi

Liste des tableaux

Chapitre 2

Méthodologie

Tableau I. Résultats des douze participants ayant un trouble de traitement auditif (TTA) aux six tests (SSW, SSI-ICM, monosyllabes dans le bruit, PPST, DPT, RGDT) évaluant les capacités auditives centrales (N : normal; AN : anormal; NT : Non testé). L'âge de l'enfant lors de la première rencontre a été indiqué..... 23

Tableau II. Résumé du déroulement de l'expérimentation comportementale lors des deux sessions..... 29

Tableau III. Exemple de l'ordre de présentation des essais pour les tâches d'organisation séquentielle auditive lors de la première rencontre. Le chiffre apparaissant en haut du carré représente le numéro de l'essai; le premier chiffre de la séquence indique le nombre d'éléments par séquence; les lettres indiquent le type de stimuli (Vb = verbaux /ba/ et /da/, Va = verbaux /a/ et /da/ et NV = non verbaux). Pour les séquences de deux éléments, la dernière série de chiffres indique la durée de l'intervalle interstimuli (20, 425 et 1k ms). Pour les séquences composées de plus de deux éléments, l'intervalle interstimuli était de 425 ms..... 30

Article 1

Table 1. Nine- to twelve-year-old children with hearing loss: age (years; months); age of hearing aid fitting (H/A); sex and hearing loss measured in the

| | |
|---|----|
| right ear at 250 to 8000 Hz; and level of stimuli presentation (LP) in dB HL..... | 55 |
|---|----|

Chapitre 3

Article 2

| | |
|--|-----|
| Table 1. Nine- to twelve-year-old children with hearing loss: age (years; months); age of hearing aids fitting (H/A); sex and hearing loss measured in the right ear at 250 to 8000 Hz; PTA (average threshold of 500, 1 kHz, 2 kHz) and level of stimuli presentation (dB HL)..... | 108 |
|--|-----|

| | |
|--|-----|
| Table 2. Results of the three-way ANOVA: Group x Type of stimuli x Electrode position, with repeated measures for Type and Electrode for P1 and N2 latency and amplitude in Evoked Potential recording (from Standard stimuli)..... | 109 |
|--|-----|

| | |
|--|-----|
| Table 3. Results of the three-way ANOVA: Group X Type of stimuli X Electrode position, with repeated measures for Type and Electrode for MMR latency and amplitude..... | 110 |
|--|-----|

Résultats complémentaires

| | |
|--|-----|
| Tableau I. Pourcentage de participants dans les trois groupes (normo-entendants – NE, malentendants – ME, et trouble de traitement auditif – TTA), chez qui les ondes auditives de latence longue P1, N1, P2 et N2 ont été identifiées en fonction des stimuli : verbaux /ba/ et /da/ (V /ba/ et V /da/), non verbaux /ba/ et /da/ (NV /ba/ et NV /da/) et sons purs (1 kHz et 2 kHz) pour les tracés reliés au type de stimuli (fréquent et rare)..... | 119 |
|--|-----|

| | |
|--|-----|
| Tableau II. Résultats de l'analyse de variance entre le groupe d'enfants (normo-entendants, malentendants, un trouble de traitement auditif), le type du stimulus (verbal /ba/, non verbal /ba/ et le son pur de 1 kHz) et le site d'électrodes (FCz, Cz, CPz, C3 et C4), avec des mesures répétées pour Type et Électrode. L'analyse a été effectuée pour la valeur de la latence et de l'amplitude des ondes P1 et N2..... | 124 |
| Tableau III. Résultats de la décomposition de l'interaction triple (Groupe x Type x Electrode). L'analyse a été effectuée pour la valeur de la latence de l'onde N2. | 125 |
| Tableau IV. Résultats des tests t selon le type de stimulus (verbal /ba/, non verbal /ba/ et le son pur de 1 kHz) sur le site d'électrodes FCz, Cz, CPz, C3 et C4, pour la latence de l'analyse de variance entre le groupe d'enfants (normo-entendants, malentendants, TTA), le type du stimulus (verbal /ba/, non verbal /ba/ et le son pur de 1 kHz) et le site d'électrodes (FCz, Cz, PCz, C3 et C4), avec des mesures répétées pour Type et Électrode. L'analyse a été effectuée pour la valeur de la latence et de l'amplitude des ondes P1 et N2.l'onde de N2..... | 126 |
| Tableau V. Résultats des tests t pour les sites d'électrodes FCz, Cz, CPz, C3 et C4. L'analyse a été effectuée pour la valeur de l'amplitude de l'onde P1..... | 127 |
| Tableau VI. Résultats des tests t pour les sites d'électrodes FCz, Cz, CPz, C3 et C4, selon le type de stimulus (son pur, non verbal /ba/ et verbal /ba/). L'analyse a été effectuée pour la valeur de l'amplitude de l'onde N2..... | 129 |
| Tableau VII. Résultats de l'analyse de variance entre le groupe d'enfants (malentendants et normo-entendants), le type du stimulus (verbal /ba/, non | |

verbal /ba/ et le son pur de 1 kHz) et le site d'électrodes (FCz, Cz, CPz, C3 et C4), avec des mesures répétées pour Type et Électrode. L'analyse a été effectuée pour la valeur de la latence et de l'amplitude des ondes P1 et N2..... 131

Tableau VIII. Résultats de l'analyse de variance entre le groupe d'enfants (malentendants et un trouble de traitement auditif), le type du stimulus (verbal /ba/, non verbal /ba/ et le son pur de 1 kHz) et le site d'électrodes (FCz, Cz, CPz, C3 et C4), avec des mesures répétées pour Type et Électrode. L'analyse a été effectuée pour la valeur de la latence et de l'amplitude des ondes P1 et N2..... 132

Tableau IX. Résultats de la décomposition l'analyse de l'interaction triple (Groupe x Type du stimulus x Électrode). L'analyse a été effectuée pour la valeur de la latence de l'onde N2..... 133

Tableau X. Résultats de l'analyse de variance entre le groupe d'enfants (normo-entendants, malentendants, un trouble de traitement auditif), le type du stimulus (verbal /da/, non verbal /da/ et le son pur de 2 kHz) et le site d'électrodes (FCz, Cz, CPz, C3 et C4), avec des mesures répétées pour Type et Électrode. L'analyse a été effectuée pour la valeur de la latence et de l'amplitude des ondes P1 et N2 sur les tracés rares..... 140

Tableau XI. Résultats de la décomposition de l'interaction triple (Groupe x Type du stimulus x Électrode). L'analyse a été effectuée pour la valeur de la latence de l'onde P1..... 141

Tableau XII. Résultats des tests t pour le site d'électrodes FCz, Cz, CPz, C3 et C4. L'analyse a été effectuée pour la valeur de la latence de l'onde P1..... 142

Tableau XIII. Pourcentage de bonne réponses obtenu au test de discrimination auditive active (D) des stimuli verbaux /ba/-/da/ (V) et des stimuli non verbaux /ba/-/da/ (NV) ainsi que la présence (P) ou l'absence (A) de l'onde de négativité de discordance (ND) avec les mêmes stimuli enregistrés chez les enfants normo-entendants (NE), malentendants (ME) et les enfants ayant trouble de traitement auditif (TTA). NO : numéro du participant..... 145

Chapitre 4

Discussion générale

Tableau I. Six profils proposés en se basant sur les résultats normaux (N) ou anormaux (AN) du test d'organisation séquentielle auditive avec les stimuli verbaux /ba/-/da/, /a/- /da/ et non verbaux (transformation acoustique de /ba/ et /da/ - NV). Les six profils sont : normal (N), trouble de traitement auditif spécifique (TTA-S), trouble de traitement auditif (TTA), trouble de traitement auditif spécifique aux stimuli non verbaux (TTA-NV), problème de langage pour mettre une étiquette (L-É), retard ou trouble du langage (L-V) et trouble cognitif (C)..... 187

Annexe A

Table 1 Eight- to twelve-year-old children with hearing loss: age (years; months); age of hearing aids fitting (H/A); sex and hearing loss measured in the right ear at 250–8000 Hz (NT = not tested); and stimulus presentation level (dB HL)..... xxvii

Annexe B

| | |
|--|-------|
| Table 1. Data of nine- to ten-year-old children with hearing loss: age (years; months); age of hearing aids fitting (H/A); sex and hearing loss measured in the right ear at 250 to 8000 Hz (NT = not tested); and stimulus presentation level (dB HL)..... | lviii |
|--|-------|

Annexe C

| | |
|--|------|
| Tableau I. Présence (P) et absence (A) des ondes N1 et P2 avec les trois stimuli fréquents, son pur (1 kHz), nonverbal /ba/ (NV /ba/) et verbal (V /ba/), enregistrées chez les enfants normo-entendants (NE) âgés entre 9 et 12 ans..... | lxix |
|--|------|

| | |
|---|-----|
| Tableau II. Présence (P) et absence (A) des ondes N1 et P2 avec les trois stimuli fréquents, son pur (1 kHz), nonverbal /ba/ (NV /ba/) et verbal /ba/ (V /ba/), enregistrées chez les enfants malentendants (ME) âgés entre 9 et 12 ans..... | lxx |
|---|-----|

| | |
|--|------|
| Tableau III. Présence (P) et absence (A) des ondes N1 et P2 avec les trois stimuli fréquents, son pur (1 kHz), nonverbal /ba/ (NV /ba/) et verbal /ba/ (V /ba/), enregistrées chez les enfants ayant un trouble de traitement auditif (TTA) âgés entre 9 et 12 ans..... | lxxi |
|--|------|

Liste des figures

Méthodologie

- Figure 1.** Moyenne (et écart-type) du seuil auditif aérien (dB HL) à l'oreille droite des douze participants malentendants (ME) et des douze enfants ayant un trouble de traitement auditif (TTA) pour les fréquences de 250, 500, 1000, 2000, 4000 et 8000 Hz et des seize enfants normo-entendants (NE) pour les fréquences de 500, 1000, 2000, 4000 et 8000 Hz..... 22
- Figure 2.** Spectre acoustique de la syllabe /ba/ représenté par l'étendue fréquentielle (en kHz) en fonction de sa durée (en millisecondes).
..... 25
- Figure 3.** Spectre acoustique de la syllabe /da/ représenté par l'étendue fréquentielle (en kHz) en fonction de sa durée (en millisecondes).
..... 25
- Figure 4.** Spectre acoustique de la syllabe /a/ représenté par l'étendue fréquentielle (en kHz) en fonction de sa durée (en millisecondes)..... 26
- Figure 5.** Spectre acoustique du stimulus non verbal /ba/ représenté par l'étendue fréquentielle (en kHz) en fonction de sa durée (en millisecondes)..... 27
- Figure 6.** Spectre acoustique du stimulus non verbal /da/ représenté par l'étendue fréquentielle (en kHz) en fonction de sa durée (en millisecondes)..... 27

Article 1

Figure Captions

Figure 1. Mean number and standard deviation (bars) of correctly reproduced sequences by 16 children with normal hearing (NH), 12 children with central auditory processing disorder (CAPD), and 12 children with hearing loss (HL) as a function of the number of elements per sequence. A maximum of ten sequences are presented. Data are shown for the three stimulus pairs: sequence of two, three, and five verbal syllables /a/-/da/ (2Va), (3Va), and (5Va); sequence of two, three, and five verbal syllables /ba/-/da/ (2Vb), (3Vb), and (5Vb); and sequence of two, three, and five nonverbal stimuli (2NV), (3NV), and (5NV)..... 56

Figure 2. Mean number and standard deviation (bars) of correctly reproduced sequences by 16 children with normal hearing (NH), 12 children with central auditory processing disorder (CAPD), and 12 children with hearing loss (HL) as a function of the interstimulus interval (ISI) duration. A maximum of ten sequences are presented. Data are shown for the sequence of two elements with the three pairs of stimuli: verbal /a/-/da/ with 20, 425, and 1000 ms ISI (Va-20), (Va-425), and (Va-1K); verbal /ba/-/da/ with 20, 425, and 1000 ms ISI (Vb-20), (Vb-425), and (Vb-1K); and nonverbal /ba/-/da/ with 20, 425, and 1000 ms ISI (NV-20), (NV-425), and (NV-1K)..... 56

Chapitre 3

Figure 1. Représentation des quatre ondes classiques de latence longue obtenue chez un enfant de dix ans lors de stimulations auditives avec le son pur de 1000 Hz. P1 et P2 signifient les première et deuxième ondes positives

respectivement. N1 et N2 représentent les première et deuxième ondes négatives..... 62

Figure 2. Exemple d'une onde de négativité de discordance (ND) obtenue chez un enfant de dix ans en soustrayant le tracé fréquent (syllabe /ba/) du tracé rare (syllabe /da/). Les stimuli ont été présentés à l'oreille droite..... 63

Figure 3. Spectre acoustique du son pur de 1 kHz dont la durée est de 250 millisecondes. 74

Figure 4. Spectre acoustique du son pur de 2 kHz dont la durée est de 250 millisecondes..... 75

Figure 5. Un enfant de neuf ans portant le bonnet de *Geodesic Sensor Net* à 128 électrodes d'Ag-AgCl..... 77

Article 2

Figure 1. Waveforms recorded from three groups of children: (16 with normal hearing – NH, 12 with hearing loss – HL and 12 with central auditory processing disorder – CAPD) to the standard stimuli, 1kHz Pure tone, nonverbal /ba/ and verbal /ba/ at FCz electrode. Stimuli were presented at 70 dB HL for NH children (solid line) and for children with CAPD (dotted line) and between 85 and 100 dB HL for children with HL (dashed line) in the passive listening paradigm. The top, middle and bottom rows of waveforms display the four principal waves, P1, N1, P2 and N2, observed with respectively the 1kHz Pure tone, the nonverbal /ba/ and the verbal /ba/ stimuli. The amplitude scale is 10 uV and the latency range is -100 to 700 ms..... 111

Figure 2. The latency value and standard deviation (bars) of mismatch responses (MMRs), recorded from children with normal hearing (NH), with hearing loss (HL) and with central auditory processing disorder (CAPD), is presented with the three pair stimuli; Tone (1kHz and 2 kHz Pure tone), NV (nonverbal /ba/-/da/) and Verbal (/ba/-/da/). 111

Figure 3. The amplitude value and standard deviation (bars) of mismatch responses (MMRs), recorded from children with normal hearing (NH), with hearing loss (HL) and with central auditory processing disorder (CAPD), is presented with the three pair stimuli; Tone (1kHz and 2 kHz Pure tone), NV (nonverbal /ba/-/da/) and Verbal (/ba/-/da/). 111

Figure 4. Cortical topographies of last cortical auditory evoked potentials (CAEPs) wave (N2) to the standard stimuli (1kHz Pure tone, nonverbal /ba/ and verbal /ba/) at FCz, recorded from children with normal hearing– NH- (left column), from those with hearing loss – HL (middle column) and from children with central auditory processing disorder – CAPD (right column). 112

Figure 5. Cortical topographies of mismatch responses (MMRs) to the three pairs of stimuli: Tone (1kHz and 2 kHz Pure tone), NV (nonverbal /ba/-/da/) and Verbal (/ba/-/da/) at FCz, recorded from children with normal hearing– NH (left column), from those with hearing loss – HL (middle column) and from children with central auditory processing disorder – CAPD (right column). 112

Résultats complémentaires

Figure 6. Topographie de l'activité corticale reliée à l'onde P1 générée par le son pur de 1 kHz (son pur), le stimulus non verbal /ba/ (NV) et le stimulus verbal /ba/ (V), chez les trois groupes de participants – normo-entendants (NE), malentendants (ME) et ceux ayant un trouble de traitement auditif (TTA). 135

- Figure 7.** Topographie de l'activité corticale reliée à l'onde N2 générée par le son pur de 1 kHz (son pur), le stimulus non verbal /ba/ (NV) et le stimulus verbal /ba/ (V), chez les participants normo-entendants (NE) et malentendants (ME)..... 137
- Figure 8.** Topographie de l'activité corticale reliée à l'onde N2 générée par le son pur de 1 kHz (son pur), le stimulus non verbal /ba/ (NV) et le stimulus verbal /ba/ (V), chez les participants ayant un trouble de traitement auditif (TTA) et malentendants (ME)..... 138
- Figure 9.** Corrélacion entre la latence de l'onde N2 et la tâche d'organisation séquentielle auditive (OSA) avec les stimuli verbaux (moyenne de deux, trois et cinq éléments par séquence) calculée à partir des données des 40 participants..... 146
- Figure 10.** Corrélacion entre l'amplitude de l'onde N2 et la tâche d'organisation séquentielle auditive (OSA) avec les stimuli verbaux (moyenne de deux, trois et cinq éléments par séquence) calculée à partir des données des 40 participants..... 147
- Figure 11.** Corrélacion entre la latence de l'onde N2 et la tâche d'organisation séquentielle auditive (OSA) avec les stimuli verbaux (moyenne de 20, 425 et 1000 ms) calculée à partir des données des 40 participants..... 148
- Figure 12.** Corrélacion entre l'amplitude de l'onde N2 et la tâche d'organisation séquentielle auditive (OSA) avec les stimuli verbaux (moyenne de 20, 425 et 1000 ms) calculée à partir des données des 40 participants..... 149

Figure 13. Corrélacion entre la latence de l'onde N2 et la tâche d'organisation séquentielle auditive (OSA) avec les stimuli verbaux (moyenne de deux, trois et cinq éléments par séquence) calculée à partir des données des 12 participants..... 150

Figure 14. Corrélacion entre l'amplitude de l'onde N2 et la tâche d'organisation séquentielle auditive (OSA) avec les stimuli verbaux (moyenne de deux, trois et cinq éléments par séquence) calculée à partir des données des 12 participants..... 151

Figure 15. Corrélacion entre la latence de l'onde N2 et la tâche d'organisation séquentielle auditive (OSA) avec les stimuli verbaux (moyenne de 20, 425 et 1000) calculée à partir des données des 12 participants..... 152

Figure 16. Corrélacion entre l'amplitude de l'onde N2 et la tâche d'organisation séquentielle auditive (OSA) avec les stimuli verbaux (moyenne de 20, 425 et 1000) calculée à partir des données des 12 participants..... 153

Chapitre 4

Discussion générale

Figure 1. Score Z des 12 enfants malentendants (ME) établi à partir des résultats des 16 participants normo-entendants (moyenne de deux, trois et cinq éléments par séquence). Les trois enfants malentendants ayant le plus de difficultés dans la tâche d'organisation séquentielle auditive sont identifiés par un triangle (ME 3, ME 11 et ME 12)..... 158

Figure 2. Score Z des 12 enfants malentendants (ME) établi à partir des résultats des 16 participants normo-entendants (moyenne de séquences des

trois IIS : 20, 425 et 1000 ms). Les trois enfants malentendants ayant le plus de difficultés dans la tâche d'organisation séquentielle auditive sont identifiés par un triangle (ME 3, ME 11 et ME 12). 159

Figure 3. Âge des 12 enfants malentendants (ME) qui ont participé à l'étude. Les triangles identifient les enfants ayant éprouvé le plus de difficultés à réaliser les tâches d'organisation séquentielle auditive avec les stimuli verbaux /ba/ et /da/..... 161

Figure 4. Moyenne des sons purs mesurée à 500, 1000 et 2000 Hz à l'oreille droite. Les valeurs sont illustrées pour les 12 enfants malentendants (ME). Les triangles identifient les enfants ayant éprouvé le plus de difficultés à réaliser les tâches d'organisation séquentielle auditive avec les stimuli verbaux /ba/ et /da/..... 162

Figure 5. Âge auquel les 12 enfants malentendants (ME) ont commencé à porter des appareils auditifs. Les triangles identifient les enfants ayant éprouvé le plus de difficultés à réaliser les tâches d'organisation séquentielle auditive avec les stimuli verbaux /ba/ et /da/..... 163

Figure 6. Nombre d'années pendant lesquelles les 12 enfants malentendants (ME) ont porté leurs appareils auditifs. Les triangles identifient les enfants ayant éprouvé le plus de difficultés à réaliser les tâches d'organisation séquentielle auditive avec les stimuli verbaux /ba/ et /da/..... 164

Figure 7. Moyenne et écart-type de la latence de l'onde N2 obtenue auprès d'enfants normo-entendants (NE), malentendants (ME) et ayant un trouble de traitement auditif (TTA), en utilisant le son pur de 2 kHz (Son pur), la transformation acoustique de /da/ (NV) et la syllabe /da/ (V)..... 167

Figure 8. Score Z des 12 enfants malentendants (ME) établi à partir des

résultats des 16 participants normo-entendants (amplitude de l'onde N2 avec le son pur de 1 kHz). Les trois enfants malentendants se trouvant en dessous de deux écarts-types ou à deux écarts-types de la moyenne sont identifiés par un triangle..... 168

Figure 9. Score Z des 12 enfants malentendants (ME) établi à partir des résultats des 16 participants normo-entendants (amplitude de l'onde N2 avec le stimulus non verbal /ba/). Les deux enfants malentendants se trouvant en dessous de deux écarts-types ou à deux écarts-types de la moyenne sont identifiés par un triangle..... 169

Figure 10. Score Z des 12 enfants malentendants (ME) établi à partir des résultats des 16 participants normo-entendants (amplitude de l'onde N2 avec le stimulus verbal /ba/). Les quatre enfants malentendants se trouvant en dessous de deux écarts-types ou à deux écarts-types de la moyenne sont identifiés par un triangle..... 170

Figure 11. Âge auquel les 12 enfants malentendants (ME) ont participé à l'étude. Les triangles identifient les enfants malentendants se trouvant en dessous de deux écarts-types ou à deux écarts-types de la moyenne pour l'amplitude de l'onde N2..... 173

Figure 12. Tracés électrophysiologiques des enfants des trois groupes : normo-entendants (NE), malentendants (ME) et ayant un trouble de traitement auditif (TTA) enregistrés avec le son pur de 1 kHz. La colonne de gauche illustre les données des enfants plus jeunes (NE = 9 ans et 3 mois, ME = 9 ans et 8 mois, TTA = 9 ans et 9 mois) et la colonne de droite représente les données des enfants plus âgés (NE = 11 ans et 6 mois, ME = 11 ans et 5 mois, TTA = 11 ans et 5 mois)..... 174

Figure 13. Moyenne des sons purs mesurée à 500, 1000 et 2000 Hz à l'oreille

droite. Les valeurs sont illustrées pour les 12 enfants malentendants (ME). Les triangles identifient les enfants malentendants se trouvant en dessous de deux écarts-types ou à deux écarts-types de la moyenne pour l'amplitude de l'onde N2..... 176

Figure 14. Âge auquel les 12 enfants malentendants (ME) ont commencé à porter des appareils auditifs. Les triangles identifient les enfants malentendants se trouvant en dessous de deux écarts-types ou à deux écarts-types de la moyenne pour l'amplitude de l'onde N2..... 178

Figure 15. Nombre d'années que les 12 enfants malentendants (ME) ont porté leurs appareils auditifs. Les triangles identifient les enfants malentendants se trouvant en dessous de deux écarts-types ou à deux écarts-types de la moyenne pour l'amplitude de l'onde N2. 179

Figure 16. Score Z des 12 enfants malentendants (ME) établi à partir des résultats des 16 participants normo-entendants (moyenne de deux, trois et cinq éléments par séquence) avec les stimuli verbaux /a/ et /da/. Les trois enfants malentendants ayant eu le plus de difficultés dans la tâche d'organisation séquentielle auditive sont identifiés par un triangle (ME 3, ME 11 et ME 12)..... 188

Figure 17. Score Z des 12 enfants malentendants (ME) établi à partir des résultats des 16 participants normo-entendants (moyenne de deux, trois et cinq éléments par séquence) avec les stimuli non verbaux /ba/ et /da/. Les trois enfants malentendants ayant eu le plus de difficultés dans la tâche d'organisation séquentielle auditive sont identifiés par un triangle (ME 3, ME 11 et ME 12)..... 189

Figure 18. Score Z des 12 enfants malentendants (ME) établi à partir des résultats des 16 participants normo-entendants (moyenne de trois intervalles de

20, 425 et 1000 ms) avec les stimuli verbaux /a/ et /da/. Les trois enfants malentendants ayant eu le plus de difficultés dans la tâche d'organisation séquentielle auditive sont identifiés par un triangle (ME 3, ME 11 et ME 12)..... 190

Figure 19. Score Z des 12 enfants malentendants (ME) établi à partir des résultats des 16 participants normo-entendants (moyenne de trois intervalles de 20, 425 et 1000 ms) avec les stimuli non verbaux /ba/ et /da/. Les trois enfants malentendants ayant eu le plus de difficultés d'organisation séquentielle auditive avec /ba/ et /da/ sont identifiés par un triangle (ME 3, ME 11 et ME 12)..... 191

Annexe A

Figure 1. Mean number and standard deviation (bars) of correctly reproduced sequences by children with hearing loss (HL) and children with normal hearing (NH) as a function of the number of elements per sequence. Maximum number of correctly reproduced sequences is 10. Data are shown for the three pairs of stimuli: verbal syllables /a-/da/ (Va), nonverbal stimuli (NV), and verbal syllables /ba-/da/ (Vb). Verbal /a-/da/ was reproduced by 13 children with hearing loss (Va HL) and 13 with normal hearing (Va NH); nonverbal stimuli was reproduced by 10 children with hearing loss (NV HL) and 11 children with normal hearing (NV NH); and verbal /ba-/da/ was reproduced by 7 children with hearing loss (Vb HL) and 13 children with normal hearing (Vb NH)..... xxviii

Figure 2 Mean number and standard deviation (bars) of sequences correctly reproduced by children with hearing loss (HL) and children with normal hearing (NH) as a function of interstimulus interval (ISI) duration. Maximum number of correctly reproduced sequences is 10. Data are shown for the three

pairs of stimuli: verbal syllables /a-/da/ (Va), nonverbal stimuli (NV), and verbal syllables/ba-/da/ (Vb). Verbal /a-/da/ was reproduced by 13 children with hearing loss (Va HL) and 13 with normal hearing (Va NH); nonverbal stimuli were reproduced by 10 children with hearing loss (NV HL) and 11 children with normal hearing (NV NH); and verbal/ba-/da/was reproduced by 7 children with hearing loss (Vb HL) and 13 children with normal hearing (Vb NH).....

xxviii

Annexe B

Figure 1. Waveforms recorded at FCz electrode from five children with normal hearing – NH (solid line) and five with hearing loss – HL (dashed line) with 1 kHz pure tone (top), nonverbal /ba/ (middle) and /ba/ (bottom) stimuli.....

lix

Figure 2. P1 and N2 mean latency values and standard deviation recorded of five children with hearing loss (HL) and five children with normal hearing (NH) with 1 kHz pure tone (T), nonverbal /ba/ (NV) and verbal /ba/ (V) stimuli.....

lix

Figure 3. P1 and N2 mean amplitude values and standard deviation of five children with hearing loss (HL) and five children with normal hearing (NH) with 1 kHz pure tone (T), nonverbal /ba/ (NV) and verbal /ba/ (V) stimuli.....

lix

Figure 4. The grand average ERPs of five children with normal hearing (NH) and the five children with hearing loss (HL), elicited by the standard stimuli (solid lines): 1 kHz pure tone (top), nonverbal /ba/ (middle) and /ba/ (bottom); by the deviant stimuli (dotted lines): wide band noise (top), nonverbal /da/ (middle) and /da/ (bottom). The Mismatch Response (MMR) is represented by a bold dashed line.....

lix

Figure 5. The latency value and standard deviation (bars) of the negative MMR, recorded from five children with hearing loss (HL) and five children with normal hearing (NH) are presented for the three stimulus pairs; Tone (1 kHz Pure tone and wide band noise), NV (nonverbal /ba-/da/) and Verbal (/ba-/da/)..... lix

Figure 6. The amplitude value of the negative MMR, recorded from five children with hearing loss (HL) and five children with normal hearing (NH) is shown for the three pairs of stimuli; Tone (1kHz Pure tone and wide band noise), NV (nonverbal /ba-/da/) and Verbal (/ba-/da/)..... lx

Figure 7. The latency, amplitude value and standard deviation (bars) of the positive MMR, recorded with the pair 1kHz Pure tone and wide band noise from five children with hearing loss (HL) and five children with normal hearing (NH)..... lx

Liste des sigles, acronymes et abréviations

APD – auditory processing disorder

ASHA – American Speech-Language-Hearing Association

ASO – auditory sequential organization

CAEP – cortical auditory evoked potentials

IIS – intervalle interstimuli

ISI – Interstimulus interval

MMN – mismatch negativity

MMR – mismatch responses

ND – négativité de discordance

OSA – organisation séquentielle auditive

PÉALL – potentiels évoqués auditifs de latence longue

TTA – trouble de traitement auditif

Remerciements

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude, mes très sincères remerciements et toute ma reconnaissance à mon directeur, Dr Benoît Jutras, qui m'a infatigablement accompagnée tout au long de ces années d'aventure au doctorat. Ses conseils judicieux, son regard critique, sa grande générosité de son temps, son souci du travail bien fait et sa grande implication constante m'ont énormément aidée à traverser les étapes des études doctorales. Sans lui, la réalisation de ce travail n'aurait pu être possible.

Je tiens également à remercier chaleureusement Dre Maryse Lassonde qui m'a fait l'honneur de lire et commenter les multiples versions des mes deux articles en électrophysiologie. Je lui suis également très reconnaissante d'avoir mis à ma disposition son laboratoire en électrophysiologie du CHU Sainte-Justine.

Mes plus sincères remerciements s'adressent aux participants et à leurs parents qui ont généreusement offert de leur temps en participant à mon projet de recherche. Sans leur collaboration, cette thèse n'aurait pu voir le jour.

Ces années de doctorat n'auraient pas été aussi agréables et productives sans l'aide de plusieurs étudiantes, amies et collègues en audiologie. Je tiens à les remercier d'avoir contribué, de près ou de loin, à la concrétisation de cette thèse de doctorat. Un merci particulier s'adresse à Marie-Claude Godin, Katherine Randall, Wafaa Rhoualem et Marie-Michèle Béliveau, qui m'ont apporté leur aide précieuse dans la cueillette de données et lors du déroulement des expérimentations comportementales et électrophysiologiques. Je tiens également à remercier Mojgan Owliaey, audiologiste,

de m'avoir aidée dans le recrutement des participants ayant un trouble de traitement auditif. Merci à Josée Lagacé, ma collègue de bureau, pour nos discussions agréables, son écoute et son soutien inconditionnel. Merci aussi au personnel des centres de réadaptation, Institut Raymond-Dewar, Centre montréalais de réadaptation et Le Bouclier ainsi que du cabinet privé Audio-conseil pour leur collaboration lors du recrutement des candidats potentiels de mon étude.

J'aimerais également souligner l'aide considérable de Madame Phetsamone Vannasing lors de l'expérimentation en électrophysiologie. Ses connaissances, sa débrouillardise et ses précieux conseils lors de l'analyse des résultats ont contribué à l'avancement de mes travaux en électrophysiologie.

Je tiens à remercier Monsieur Daniel Chrétien pour la révision linguistique de la discussion de ma thèse.

Je voudrais aussi exprimer ma reconnaissance au Centre de recherche du CHU Sainte-Justine, à l'Université de Montréal et aux Fonds de recherche en santé du Québec pour leur soutien financier.

Enfin, mes remerciements les plus chaleureux s'adressent à ma famille, ma mère, mes frères, mes sœurs, mon conjoint Akbar et mon fils Ali. Vous m'avez accompagnée et encouragée constamment tout au long de ces années de doctorat. Je tiens à vous remercier tous d'avoir cru en moi (même plus que moi-même), dans tous ces moments où je me remettai en question. Akbar, mon succès a toujours été une priorité pour toi! Merci pour la fierté que tu as toujours montrée envers mon travail. Un merci au-delà

des mots à mon ange, Ali, qui a manqué des heures irrécupérables d'attention et d'écoute. Malgré ton jeune âge, tu t'es soucié de moi et m'as offert des moments inoubliables. Merci à l'amour et la joie que tu me donnes à chaque jour!

*"Quand tu partiras pour Ithaque, souhaite que le chemin soit long, riche en péripéties et en expériences. Ne crains ni les Lestrygons, ni les Cyclopes, ni la colère de Neptune. Tu ne verras rien de pareil sur ta route si tes pensées restent hautes, si ton corps et ton âme ne se laissent effleurer que par des émotions sans bassesse. Tu ne rencontreras pas des Lestrygons, des Cyclopes, ni le farouche de Neptune, si tu ne les portes pas en toi-même, si ton cœur ne les dresse pas devant toi. Souhaite que le chemin soit long,
Garde sans cesse Ithaque présente à ton esprit. Ton but final est d'y parvenir, mais ne hâte pas du tout ton voyage : mieux vaut qu'il dure de longues années et que tu abordes enfin dans ton île aux jours de ta vieillesse, riche de tout ce que tu as gagné en chemin sans t'attendre à ce qu'Ithaque te donne des richesses....
Ithaque t'a donné le beau voyage: sans elle, tu ne te serais pas mis en route....."*

Constantinos P. Caváfis

À mon père qui vit toujours dans mes pensées

À ma mère, Akbar et Ali

Chapitre 1

1. Introduction

1.1. Problématique

Les troubles auditifs ont des conséquences majeures dans plusieurs sphères de la vie d'un enfant, notamment sur l'acquisition du langage (Wake et al., 2004), la réussite scolaire (Wake et al., 2004; Bess et al., 1998) et le développement social (Arnold, 1999). Ils seraient suffisamment importants pour limiter une ou plusieurs activités de la vie quotidienne d'un enfant.

L'audition repose sur le fonctionnement de deux systèmes : le système auditif périphérique (l'oreille externe, moyenne et interne ainsi que le nerf auditif) et le système auditif central (les voies auditives du tronc cérébral aux aires auditives corticales). Des dysfonctions ou déficiences dans le système auditif périphérique causeront une surdité. La personne aura un problème à entendre. Par contre, des dysfonctions dans le système auditif central causeront un trouble de traitement auditif. L'individu aura alors un problème à comprendre les messages verbaux en l'absence d'une surdité.

Contrairement à la surdité, le trouble de traitement auditif est détecté tardivement. En effet, il est identifié à l'âge scolaire lorsque l'enfant est confronté à de plus grandes demandes au plan de l'écoute. Les problèmes d'apprentissage de ces enfants sont généralement la raison de consultation en audiologie. Les difficultés scolaires sont également présentes chez les enfants malentendants. Les enfants ayant une surdité modérée ou sévère présentent deux à trois ans de retard au plan des apprentissages scolaires (Bess et al., 1998). Le pourcentage d'échecs scolaires est 11 fois plus élevé chez les enfants malentendants que chez les enfants entendants (Bess et

al., 1998). On pourrait penser que la surdité serait l'unique cause des difficultés d'apprentissage des enfants malentendants. Cependant, le pourcentage élevé d'échecs scolaires peut être aussi relié au fait que certains enfants malentendants ont également un trouble de traitement auditif.

Actuellement, la majorité des tests cliniques ne permet pas d'évaluer les capacités auditives centrales des enfants ayant une surdité. En effet, aucune norme n'a été établie pour les enfants malentendants. Cette absence de normes découle d'une difficulté à mesurer l'influence de la perte périphérique sur les performances aux tests auditifs centraux. Pour développer des outils valides et sensibles, il faut d'abord comprendre la relation qui existe entre le système auditif périphérique et le système central.

Des études effectuées chez les animaux suggèrent que la surdité peut entraîner des changements corticaux. En effet, les études ont démontré que le manque de stimulations auditives, appelé privation sensorielle, empêche le développement normal de certaines structures du système auditif central et conduit à une réorganisation neurale dans le système auditif (Illing et al., 2005; Lu et al., 2007; Trune & Morgan, 1988; Willot, 1996, 1984; Willot et al., 1993). À l'heure actuelle, les connaissances seraient limitées par rapport à l'impact de ces changements sur le développement des habiletés auditives centrales d'enfants malentendants.

L'objectif général de la thèse est de préciser les conséquences d'une perte auditive sur le traitement auditif central chez les enfants. Mieux connaître les processus de traitement auditif central d'enfants malentendants permettra éventuellement de

développer des tests et des normes identifiant de façon plus précise leurs incapacités auditives. Les cliniciens pourront alors orienter de façon plus spécifique l'intervention auprès des enfants ayant une surdité et réduire les risques d'échecs scolaires.

1.2. Organisation de la thèse

La thèse est composée de quatre chapitres. Le présent chapitre d'introduction compte l'inventaire des connaissances relié aux troubles auditifs tout en abordant les conséquences de ces troubles sur les rendements académiques.

Le chapitre 2 de la thèse contient un article scientifique intitulé « *Auditory temporal-organization abilities in school-aged children with peripheral hearing loss* ». Cet article présente les résultats de l'évaluation de l'organisation séquentielle auditive d'enfants ayant une surdité, d'enfants ayant trouble de traitement auditif et d'enfants ayant un fonctionnement auditif normal. Cet article a été soumis à *Journal of Speech, Language, and Hearing Research* en vue de publication. Des données préliminaires sur le sujet ont été obtenues dans le cadre d'un travail de recherche de maîtrise. Elles ont été publiées dans l'*International Journal of Pediatric Otorhinolaryngology* (voir Annexe A). Avant de présenter l'étude du chapitre 2, des informations supplémentaires ont été ajoutées relatives à l'introduction et à la méthodologie. Entre autres, dans l'introduction du chapitre 2, nous présenterons la définition de l'organisation séquentielle auditive et ses composantes sous-jacentes. Cette section comprend également une synthèse des études comportementales de l'effet d'une surdité sur les habilités auditives centrales. La section de la méthodologie inclut des informations sur les participants et sur les stimuli utilisés dans l'étude.

Un deuxième article scientifique se trouve dans le chapitre 3 de la thèse. Il s'intitule « *Event Related Potentials in children with hearing loss* ». Cet article examine le fonctionnement neurophysiologique d'enfants ayant une surdité, d'enfants ayant trouble de traitement auditif et d'enfants ayant un fonctionnement auditif normal. Nous avons également réalisé une étude préliminaire sur le sujet dans le cadre d'un travail de recherche de maîtrise. Les données ont été publiées dans l'*International Journal of Pediatrics* (voir Annexe B). L'article du chapitre 3 est précédé de deux sections. La première section informe brièvement sur l'enregistrement et l'interprétation des potentiels évoqués auditifs ainsi que sur les résultats d'études ayant utilisé cette technique auprès d'individus ayant un trouble auditif. La seconde section comprend des informations supplémentaires sur la méthodologie retrouvée dans le deuxième article. À la suite de l'article, des résultats ont été ajoutés dans le but de pousser plus loin la réflexion sur le traitement de l'information auditive chez les enfants ayant une surdité.

Le dernier chapitre de la thèse – le chapitre 4 – inclut une discussion générale des résultats obtenus dans les études de la thèse, des avenues de recherches, les implications cliniques des deux études ainsi que la conclusion.

1.3. Inventaire des connaissances

1.3.1. Troubles auditifs

Les deux systèmes auditifs – périphérique et central – mettent à contribution différentes fonctions et processus pour que les informations acoustiques soient entendues et comprises. De façon générale, les structures périphériques du système auditif sont responsables de l'encodage de la fréquence, de la durée et de l'intensité des sons. Quant au système auditif central, à travers les différents relais, il décode et encode l'information auditive pour finalement l'intégrer dans le cerveau.

Les troubles d'audition surviennent à la suite d'atteintes ou de dysfonctions à l'un ou l'autre des deux systèmes ou aux deux systèmes à la fois. Les personnes ayant une surdité, où les dommages se trouvent dans le système auditif périphérique, éprouvent des difficultés à détecter certains sons de la parole. Ce n'est pas le cas des personnes ayant un trouble de traitement auditif. Ces dernières détectent bien les sons, mais elles ont du mal à percevoir le message verbal dans le bruit et à discriminer les sons de la parole. La dysfonction serait dans les structures du système auditif central. La prévalence d'enfants ayant une surdité prélinguistique de degré léger à profond varie entre 1,5 et 20 par 1000 (Tang et al., 2006; Bess et al., 1998; Parving, 1993; White & Behrens, 1993; Watkin et al., 1991). D'autre part, on estime que la prévalence d'enfants ayant un TTA varie entre 2 à 3% (Chermak & Musiek, 1997). La population du Canada est constituée de 17 % de jeunes de moins de 15 ans (Statistique Canada, 2010), on retrouverait donc entre 120 000 et 280 000 enfants présentant un trouble auditif au pays de toute nature.

1.3.1.1. Conséquences des troubles auditifs

Plusieurs études ont démontré que les enfants ayant une surdité de degré légère à modérée ou à modérément sévère ont plus des difficultés académiques que leur pairs entendants (Khairi et al., 2010; Wake et al., 2004 ; Bess et al., 1998 ; Davis et al., 1986).

Bess et al. (1998) ont effectué une étude auprès de 1218 enfants comprenant des élèves de 3^e et 6^e année de niveau primaire et de 3^e année de niveau secondaire. Le but de cette étude était de déterminer la prévalence d'une surdité légère chez les enfants d'âge scolaire et d'évaluer les performances académiques (lecture, écriture, langage, compétence de base en mathématique et en science) des enfants ayant une surdité neurosensorielle de degré léger. Les résultats ont démontré que les performances scolaires d'enfants malentendants de 3^e année primaire étaient significativement inférieures à celles des enfants entendants dans la majorité des tests utilisés. Cette différence n'a pas été observée chez les deux groupes entendants et malentendants de 6^e année primaire et de 3^e année secondaire. Selon les auteurs, le test utilisé serait assez sensible aux difficultés scolaires de jeunes élèves, mais ne serait probablement pas suffisamment sensible pour refléter les difficultés scolaires des enfants plus âgés.

Bess et al. (1998) ont aussi utilisé le questionnaire *Screening Instrument for Targeting Education Risk* pour évaluer les aspects suivants : les comportements scolaires, les performances académiques, la communication, l'attention et la participation dans la classe. Les résultats ont démontré que les enfants malentendants des trois groupes sont plus à risque d'avoir un échec scolaire que les enfants

entendants. Une consultation des dossiers scolaires des enfants participants à cette étude montrait que 33% des enfants malentendants ont répété au moins une année scolaire comparativement aux enfants entendants où seulement 3% ont repris une année scolaire (Bess et al., 1998).

Il faut cependant émettre certaines réserves quant à l'interprétation de ces résultats. En effet, cette étude a permis de dépister les enfants ayant une surdité légère. Les enfants malentendants de cette étude n'avaient donc reçu aucun service en audiologie. On pourrait penser que si ces enfants avaient eu une consultation en audiologie et que leur surdité avait été détectée précocement, la prévalence des échecs scolaires serait probablement moins élevée comparativement à celle trouvée dans l'étude de Bess et al. (1998). Selon les résultats de cette étude, le pourcentage d'échecs scolaires est 11 fois plus élevé chez les enfants malentendants que chez les enfants entendants. Les autres études ont également démontré qu'une surdité légère, moins importante, pourrait menacer l'apprentissage scolaire des enfants malentendants (Most, 2004; Wake et al., 2004; Davis et al., 1986). On pourrait croire que les difficultés d'apprentissage des enfants malentendants seraient reliées uniquement à leur surdité. Les enfants ayant une surdité ont un accès limité aux informations acoustiques selon le degré de surdité. Toutefois, il est aussi possible que pour certains de ces enfants, les échecs scolaires soient causés par la présence d'un trouble de traitement auditif. Cependant, les tests cliniques ne permettent pas de poser un diagnostic de trouble de traitement auditif chez les enfants malentendants. En effet, les tests évaluant le système auditif central n'ont aucune norme permettant l'interprétation des résultats obtenus auprès de ces enfants.

Selon les données d'études menées auprès d'adultes, les résultats des tests de patron de tonalité - Pitch Pattern Sequence Test (PPST) (Musiek & Pinheiro, 1987), de patron de durée - Duration Pattern Test (DPT) (Musiek et al., 1990) et d'identification de phrases présentés de façon dichotique - Dichotic Sentence Identification Test (DSIT) (Fifer et al., 1983) ne seraient pas affectés par une surdité. Cependant, les résultats de l'étude de Neijenhuis et al. (2004) ont montré que même une surdité légère peut influencer négativement les résultats de tests évaluant les habiletés auditives centrales. Ils ont évalué 24 adultes ayant une perte auditive neurosensorielle légère et 24 adultes ayant une acuité auditive normale. Les tests ont été effectués à deux niveaux de présentation chez les adultes malentendants : niveau recommandé (60-70 dB SPL) et niveau variable entre 9 et 18 dB SL au dessus du niveau du seuil auditif. Les résultats de cette étude ont démontré que les participants du groupe expérimental avaient des résultats inférieurs à ceux des adultes du groupe contrôle, notamment pour les PPST et DPT. Ces différences étaient plus significatives quand le niveau de présentation était fixe.

En somme, on possède peu des connaissances sur les capacités auditives centrales d'enfants malentendants. Toutefois, des études montrent que l'organisation séquentielle auditive (OSA) d'enfants malentendants serait touchée (Jutras & Gagné, 1999; Koravand et al., 2010). Nous aborderons de ce thème dans le prochain chapitre.

Chapitre 2

2. Capacité auditive d'ordre temporel chez les enfants malentendants

2.1. Organisation séquentielle auditive

L'OSA se définit comme étant la capacité à conserver, dans l'ordre approprié, l'empreinte laissée par une suite de stimuli acoustiques (Leroux et al., 1993). Cette habileté est importante pour la perception de la parole. La structure du langage implique la perception et le rappel de l'ordre dans lequel apparaissent les sons de la parole (Hirsh, 1959). Selon Pinheiro & Musiek (1985), l'organisation séquentielle de stimuli acoustiques est l'une des habiletés dont le traitement s'effectue dans le système auditif central. La durée du stimulus, l'intervalle interstimuli, la perception de l'ordre temporel et la mémoire à court terme sont les principales composantes sous-jacentes à l'organisation séquentielle de stimuli acoustiques (Jutras & Gagné, 1996).

2.1.1. Durée du stimulus et de l'intervalle interstimuli

Il existe une relation de dépendance entre le seuil d'audibilité et la durée du stimulus pour les stimuli ayant une durée inférieure à 200 ms (Durant & Lovrinic, 1984). Ainsi, plus la durée du stimulus est courte, plus le niveau de pression sonore doit être élevé pour être perçu. Ce phénomène, appelé « intégration ou sommation temporelle » (Campbell & Counter, 1969), est calculé selon la différence entre le seuil de détection d'un stimulus de durées variables et celui d'une durée fixe. Cette capacité serait moins efficace chez les enfants malentendants que chez les enfants entendants (Dempsey & Maxon, 1982). En effet, Dempsey & Maxon (1982) ont noté des changements du seuil auditif moins importants pour les participants ayant une surdité que leurs pairs entendants quand la durée des stimuli était allongée.

La perception d'un intervalle de silence entre deux stimuli repose sur la capacité de résolution temporelle (Stach, 1997). Cette perception est essentielle à l'identification des séquences acoustiques. Cette habileté est également perturbée par une perte auditive périphérique (Glasberg & Moore, 1989; Glasberg et al., 1987). L'intervalle nécessaire pour effectuer cette tâche était plus grand pour les participants ayant une perte auditive cochléaire que celui mesuré chez les participants ayant une acuité auditive normale (Glasberg & Moore, 1989; Glasberg et al., 1987).

2.1.2. Perception de l'ordre temporel et mémoire à court terme

Selon les travaux de Warren (1994) la perception auditive de l'ordre peut se réaliser en deux façons : holistique ou analytique. Selon le modèle holistique, la perception se fait avec la reconnaissance globale du patron temporel des éléments. En effet, quand les éléments du patron temporel sont de courte durée et séparés par un intervalle de moins de 150 ms, ils seraient perçus et mémorisés dans leur ensemble (ex. : la reconnaissance de la musique). Le modèle analytique, quant à lui, implique l'identification des composantes d'une séquence et la reconnaissance de leur ordre. Cette méthode s'applique lorsque les éléments dans la séquence ont une durée plus longue que quelques centaines de millisecondes ou lorsqu'il y a plusieurs éléments dans une séquence (Warren, 1994). Le traitement de stimuli acoustiques lors de tâche de discrimination, d'identification des éléments d'une séquence ou lors du jugement de leur ordre temporel implique souvent les deux modèles de perception (Jutras & Gagné, 1996). En effet, plusieurs facteurs peuvent influencer la manière dont les séquences

auditives seront perçues; tel que la tâche, la familiarisation à la tâche et le nombre d'éléments dans une séquence (Jutras & Gagné, 1996).

2.1.3. Organisation séquentielle auditive et surdité

Ling (1975) a étudié le rappel de sons en séquence chez les enfants malentendants. Le but de son étude était de comparer les performances d'enfants malentendants âgés entre six et quatorze ans et d'enfants entendants de cinq ans et de neuf ans à une tâche d'OSA. Elle a utilisé des séquences de deux, trois et quatre stimuli verbaux (voyelles et consonnes) et non verbaux (bruits d'environnement) en variant l'intervalle interstimuli. Les résultats ont montré que les enfants malentendants avaient plus de difficultés que les enfants entendants pour le rappel de séquences verbales. Plus spécifiquement, les enfants malentendants ont eu plus de facilité pour le rappel de voyelles et plus de difficulté pour le rappel de consonnes. Quant au rappel de séquences des stimuli non verbaux, les enfants malentendants ont obtenu des performances supérieures à celles du groupe d'enfants entendants de cinq ans, mais inférieures à ceux des neuf ans. De plus, la performance des enfants malentendants diminuait quand la longueur des séquences passait de trois à quatre pour les deux types de stimuli. Chez les enfants entendants, cet effet n'a été noté que pour le groupe de cinq ans avec les stimuli non verbaux.

Tous les participants entendants et malentendants de l'étude pouvaient identifier correctement les stimuli verbaux et non verbaux présentés individuellement pendant les tâches préliminaires. Cependant, la tâche d'identification ne demande pas autant de traitement que celle d'OSA. En effet, le rappel de séquences de stimuli verbaux

demande un traitement rapide autant pour la reconnaissance de stimuli que pour le rappel d'ordre dans lequel les éléments ont été présentés. Les difficultés observées chez les enfants malentendants peuvent découler d'une difficulté spécifique à traiter rapidement l'information lors de la tâche d'OSA. De plus, les enfants malentendants n'ont pas été jumelés selon l'âge et le sexe avec les enfants entendants, donc ceci aurait une influence sur la comparaison de performance des deux groupes.

Jutras & Gagné (1999) ont également effectué une étude sur l'habileté d'OSA auprès de 48 enfants entendants et malentendants de 6-7 ans et de 9-10 ans. Ils ont utilisé deux types de stimuli : stimuli sonores verbaux (/ba/ et /da/) et non verbaux (un son pur de 1 kHz et un bruit de bande large). Des séquences de deux, trois, cinq, sept ou neuf éléments ayant un intervalle interstimuli (IIS) de 425 ms, ou des séquences composées de deux stimuli avec différents IIS (30 et 150 ms) ont été présentées. Les enfants devaient reproduire dans l'ordre, les séquences entendues en appuyant sur les boutons de la boîte expérimentale.

Les chercheurs ont observé que les enfants plus vieux - entendants et malentendants - obtenaient de meilleurs résultats que les 6-7 ans. De plus, ils ont constaté que les enfants malentendants de 6-7 ans avaient plus de difficulté à reproduire dans l'ordre, des séquences d'éléments verbaux que les enfants entendants, plus spécifiquement pour le rappel de deux, trois et cinq éléments. Pour le rappel de stimuli non verbaux, il n'y avait pas de différences significatives entre les performances des deux groupes. Quant au groupe d'enfants malentendants de 9-10 ans, il n'y avait aucune différence significative entre la performance des deux groupes pour le rappel de la

plupart des séquences de stimuli verbaux et non verbaux lorsque l'IIS était de 425 ms. Toutefois, les enfants malentendants ont obtenu des résultats inférieurs comparativement à ceux des enfants entendants pour le rappel de séquences verbaux où l'ISI était de courte durée.

L'empan mnésique des enfants des deux groupes d'âge a également été mesuré. Les enfants malentendants ont démontré un empan non verbal supérieur à celui de leur contrôle et un empan verbal semblable à celui des enfants entendants.

Selon les résultats obtenus, les auteurs ont conclu que la difficulté des enfants malentendants avec les stimuli verbaux était davantage reliée à des troubles perceptifs qu'à un problème de mémoire à court terme. De plus, cette difficulté avec les stimuli /ba/ et /da/ pouvait être attribuée au fait que les stimuli de nature verbale étaient traités plus difficilement que les stimuli non verbaux. Toutefois, les stimuli non verbaux utilisés dans cette étude étaient très différents (un son pur comparé à un bruit de bande large), donc la différence entre les résultats des deux groupes d'enfants pourrait être liée à la similarité acoustique de la paire /ba/ et /da/ plutôt que à leur nature linguistique.

Dans le but d'approfondir les connaissances sur l'habileté d'organisation séquentielle auditive chez les enfants malentendants et de préciser la nature de leur difficulté avec la paire /ba/ et /da/, l'étude de Jutras & Gagné (1999) a été reprise par Koravand et al. (2010) (voir Annexe A). Dans cette étude, trois paires de stimuli ont été utilisées : 1) /a-/da/, stimuli verbaux et acoustiquement différents; 2) /ba-/da/, stimuli verbaux et acoustiquement similaires; 3) une paire de stimuli non verbaux (correspondant à la transformation acoustique de la paire /ba-/da/), stimuli complexe et acoustiquement

similaires (Mody et al., 1997; Roy, 2000). Treize enfants malentendants âgés de 9 à 12 ans et treize enfants entendants du même groupe d'âge ont été soumis à des tâches d'OSA en reproduisant dans l'ordre des séquences de deux, trois et cinq stimuli verbaux ou non verbaux avec un intervalle interstimuli fixe (425 ms). Les enfants ont également reproduit des séquences de deux stimuli avec un intervalle interstimuli variable (20, 425 et 1000 ms).

Les résultats démontraient que les deux groupes d'enfants ont obtenu des performances semblables lors des tâches d'OSA avec les syllabes /a/ et /da/ et avec les stimuli non verbaux. Toutefois, les enfants malentendants démontraient une performance inférieure comparativement aux enfants entendants avec la paire /ba/ et /da/. De plus, les enfants malentendants ont obtenu des performances significativement inférieures à celles des enfants entendants avec les trois paires de stimuli pour la tâche impliquant l'écoute de deux stimuli avec un IIS de 20 ms.

Bien que le nombre d'enfants malentendants ayant effectué la tâche d'OSA avec les stimuli /ba/ et /da/ se limitait à sept, cette étude a permis d'approfondir notre connaissance sur le trouble de traitement auditif chez les enfants malentendants. En effet, les résultats obtenus suggèrent que les enfants malentendants auraient un trouble spécifique de traitement auditif. Afin de vérifier cette hypothèse et pour mieux comprendre la nature de leur difficulté, un groupe d'enfants ayant un trouble de traitement auditif s'est ajouté aux deux autres groupes dans l'étude présentée ci-après. Au préalable, des précisions méthodologiques de l'étude seront apportées dans la prochaine section.

2.2. Méthodologie

L'étude a été approuvée par les comités d'éthique du CHU Sainte-Justine et des établissements du Centre de recherche interdisciplinaire en réadaptation du Montréal métropolitain (CRIR). Une copie des lettres d'approbation et un exemplaire de chacun des formulaires de consentement sont présentés à l'Annexe E.

Dans les prochaines sections, nous détaillerons certains aspects de la méthodologie relatifs aux participants, au matériel, à l'équipement et à la procédure de la première étude.

2.2.1. Participants

Trois groupes d'enfants âgés entre 9 et 12 ans ont participé à l'expérimentation : 1) 12 enfants ayant une surdité neurosensorielle; 2) 12 enfants présentant un trouble de traitement auditif (TTA) et 3) 16 enfants normo-entendants.

Les enfants malentendants et les enfants ayant un TTA ont été recrutés par le biais des services d'audiologie de plusieurs centres de réadaptation (Institut Raymond-Dewar, Centre de réadaptation Le Bouclier, Le Centre Québécois de Réadaptation) et d'un cabinet privé. Concernant les participants ayant un fonctionnement auditif normal, ils proviennent du réseau de connaissances du personnel de recherche. Les parents ont été informés de la tenue de l'étude et restaient libres de décider s'ils voulaient ou non que leur enfant y participe.

2.2.1.1. Critères d'inclusion généraux

Tous les participants devaient présenter les critères d'inclusion suivants : 1) le français comme langue d'enseignement; 2) être droitiers, selon le test adapté de De Agostini et Dellatolas (1988); 3) ne pas présenter de trouble de développement global, d'apprentissage ou d'attention, tels que rapportés par les parents; 4) discriminer au moins 87% et identifier au moins 90% des stimuli de l'étude.

Les participants ayant une surdité 1) devaient avoir une perte auditive neurosensorielle aux deux oreilles de degré allant de léger à sévère en basant sur la moyenne des sons purs à 500, 1000 et 2000 Hz (Figure 1); 2) devaient avoir porté des appareils auditifs depuis au moins deux ans; 3) devaient avoir eu un suivi en audiologie ou en orthophonie pendant une période d'au moins deux ans. Les critères deux et trois ont été retenus afin de s'assurer que les enfants malentendants avaient reçu une stimulation auditive et langagière adéquate.

Les participants ayant un TTA devaient avoir une acuité auditive normale (seuil auditif ≤ 15 dB HL) et un diagnostic de trouble de traitement auditif. Le diagnostic a été donné lorsque les enfants avaient des résultats hors normes à deux écarts-types de la moyenne (selon les normes établies) dans une ou plusieurs épreuves auditives centrales.

Les épreuves administrées ont été les suivantes (voir Tableau I) :

a) Adaptation en français du test *Staggered Spondaic Word* – SSW (Rudmin & Normandin, 1983)

Le SSW est un test d'écoute dichotique mesurant l'intégration binaurale. Cette épreuve comprend 40 séries de quatre mots différents. Pour chaque série, l'enfant entend quatre mots dans les deux oreilles qu'il doit répéter selon l'ordre entendu. Le premier mot est entendu à une oreille. Par la suite, le deuxième mot et le troisième mot sont entendus dans les deux oreilles en même temps (en compétition). Enfin, le dernier mot sera entendu à l'autre oreille. Le niveau de présentation des mots est de 50 dB au dessus de la moyenne des seuils auditifs à 500 Hz, 1 kHz et 2 kHz bilatéralement.

b) Adaptation en français du test *Synthetic Sentence Identification Ipsilateral Competing Message* – SSI-ICM (Lynch & Normandin, 1983)

Il s'agit d'un test évaluant les habiletés auditives de séparation figure-fond et de suppléance auditive. Dans cette épreuve, l'enfant entend une histoire dans une oreille. En même temps, dans la même oreille, celui-ci entend des phrases qu'il doit identifier parmi un choix de dix, soit en donnant le numéro de la phrase à partir d'une liste remise à l'enfant ou en répétant les mots entendus. Le niveau de présentation des phrases est de 50 dB au dessus de la moyenne des seuils auditifs à 500 Hz, 1 kHz et 2 kHz bilatéralement. Il demeure toujours constant. Le niveau de présentation de l'histoire varie selon des rapports signal/bruit de -10, 0 et +10.

c) Identification de monosyllabes dans le bruit

Ce test évalue la séparation figure/fond ou la suppléance mentale. Des monosyllabes sont présentés dans la même oreille simultanément à un bruit de fond au niveau normal de conversation (autour de 50 dB HL) avec rapport signal/bruit de 0.

d) *Pitch Pattern Sequence test – PPST (Musiek, 1994)*

Ce test évalue les habiletés d'ordre temporel, de discrimination fréquentielle et d'étiquetage linguistique. Pour ce test, l'enfant entend des séquences de trois sons consécutifs, dont deux sont de même fréquence, présentés une oreille à la fois, au niveau normal de conversation. Il doit identifier verbalement et en fredonnant chaque son comme étant aigu (haut, H) (1122 Hz ou 1430) ou grave (bas, B) (880 Hz). Par exemple, pour une séquence composée des sons de 880 Hz, 1122 Hz et 880 Hz, l'enfant doit dire *Bas, Haut, Bas* ou les fredonner dans l'ordre selon leur tonalité. Les six patrons de séquences sont les suivants : BBH, BHH, BHB, HHB, HBB, HBH.

e) *Duration Pattern Sequence Test – DPT (Musiek, 1994)*

Le but de ce test est d'évaluer les habiletés d'ordre temporel, de discrimination de durée et d'étiquetage linguistique. L'enfant entend des séquences de trois sons de 1000 Hz, dont deux ont la même durée, présentés à chaque oreille séparément, au niveau normal de conversation. L'enfant doit reproduire verbalement les séquences en disant court ou long (ex. : court, court, long pour une séquence de 250 ms, 250 ms et 500 ms).

f) *Random Gap Detection Test – RGDT (Keith, 2000)*

Ce test évalue l'habileté de résolution temporelle. L'épreuve contient deux sons de même fréquence administrée aux deux oreilles au niveau normal de conversation avec un temps de silence entre les deux sons variant aléatoirement entre 2, 5, 10, 15,

20, 25, 30 et 40 ms. L'enfant doit indiquer s'il perçoit un ou deux sons. Le test compte quatre fréquences (500, 1000, 2000 et 4000 Hz).

Selon les résultats illustrés dans le tableau I, les enfants ayant un TTA de l'étude ont échoué le plus souvent les tests SSI-ICM (67 %) et SSW (67 %). Quant au test d'identification de monosyllabes dans le bruit, il a été échoué par 25 % des enfants. Seulement 17 % des enfants TTA ont échoué les tests du PPST et DPT. Tous les enfants ont bien réussi le RGDT. Le nombre de tests échoués par les enfants variait entre un seul test jusqu'à trois tests : trois enfants ont échoué un seul test, cinq deux tests et quatre ont échoué trois tests. La majorité des enfants remplissaient les critères d'ASHA, (2005), notamment avoir des résultats anormaux à au moins deux tests ou à un seul test avec des résultats se situant à au moins trois écarts-types de la moyenne et que l'habileté auditive altérée soit en lien avec les symptômes rapportés. Dans la présente étude, trois enfants n'ont pas rempli ces critères. Cependant, ces trois enfants avaient déjà eu des évaluations des habiletés auditives centrales par des audiologistes, dont la dernière évaluation soulignait encore des incapacités auditives persistantes.

Les participants normo-entendants devaient avoir une acuité auditive dans les limites de la normale bilatéralement, c'est-à-dire des seuils en conduction aérienne inférieurs ou égaux à 15 dB HL à 500, 1000, 2000, 4000 et 8000 Hz (Figure 1).

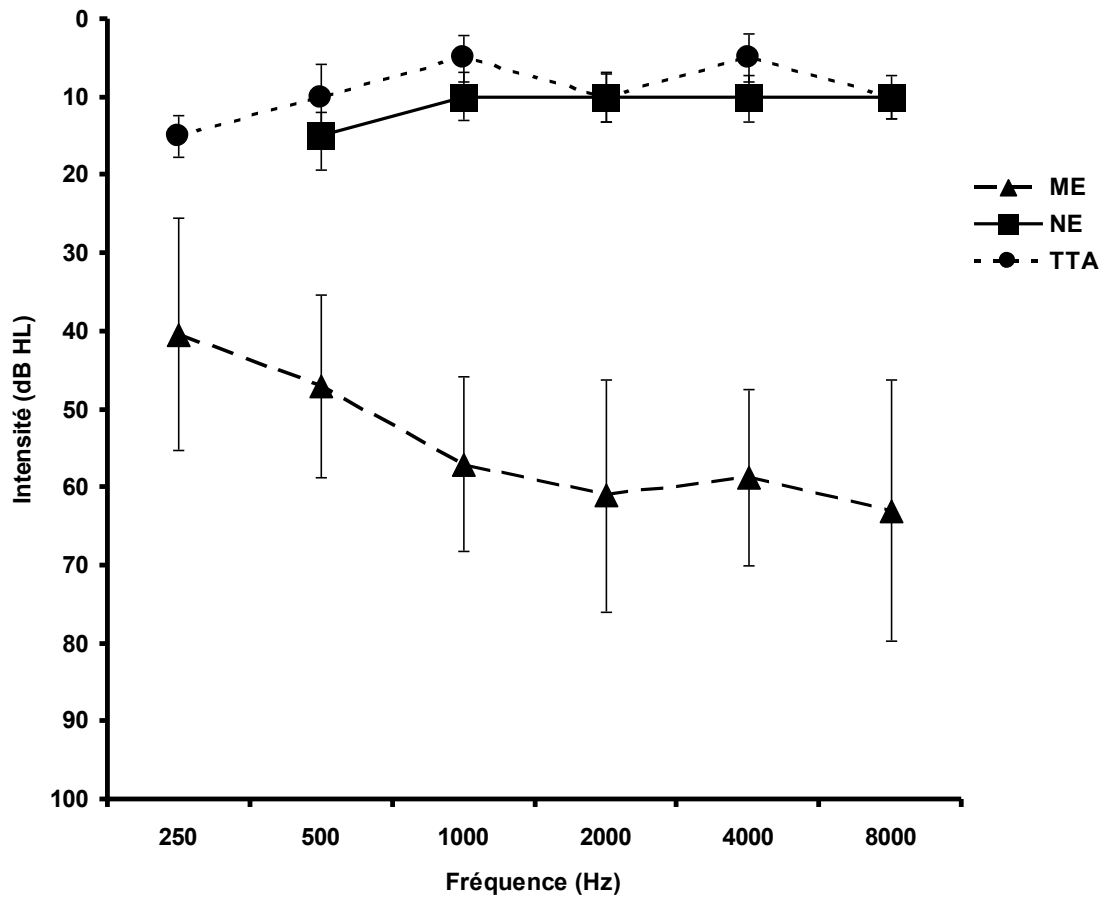


Figure 1. Moyenne (et écart-type) du seuil auditif aérien (dB HL) à l'oreille droite des douze participants malentendants (ME) et des douze enfants ayant un trouble de traitement auditif (TTA) pour les fréquences de 250, 500, 1000, 2000, 4000 et 8000 Hz et des seize enfants normo-entendants (NE) pour les fréquences de 500, 1000, 2000, 4000 et 8000 Hz.

Tableau I. Résultats des douze participants ayant un trouble de traitement auditif (TTA) aux six tests (SSW, SSI-ICM, monosyllabes dans le bruit, PPST, DPT, RGDT) évaluant les capacités auditives centrales (N : normal; AN : anormal; NT : Non testé). L'âge de l'enfant lors de la première rencontre a été indiqué.

| Résultats des tests auditifs centraux | | | | | | | |
|--|------------|---|----------------|-----------------------|-------------|------------|-------------|
| Participant | Âge | SSW | SSI-ICM | Mono bruit | PPST | DPT | RGDT |
| 1 | 10 | AN dans la condition droite non compétitive. Aucun biais significatif | AN à -10 | N | N | N | N |
| 2 | 11;01 | N aux quatre conditions Aucun biais significatif | AN à -10 | N | N | N | N |
| 3 | 12;02 | AN dans les conditions gauche compétitive et non compétitive. Biais significatif de l'oreille H/B | AN à -10 | N | N | N | N |
| 4 | 10;09 | AN aux deux conditions compétitives. Aucun biais significatif | AN à -10 | AN | N | N | N |
| 5 | 10;04 | AN aux deux conditions compétitives. Aucun biais significatif | AN à -10 | N | N | N | N |
| 6 | 11;05 | N aux quatre conditions. Aucun biais significatif | AN à 0 et -10 | N | N | NT | NT |
| 7 | 9;11 | AN aux deux conditions compétitives. Aucun biais significatif | N | N | N | NT | NT |
| 8 | 11;04 | N aux quatre conditions. Aucun biais significatif | N | AN | N | N | N |
| 9 | 10;11 | AN dans la condition droite compétitive. Biais significatif du mot B/H | N | N | AN | AN | N |
| 10 | 11;07 | AN aux deux conditions compétitives. Biais de l'oreille H/B | N | AN | N | AN | N |
| 11 | 9;05 | AN aux quatre conditions. Aucun biais significatif | AN à -10 | N | N | NT | NT |
| 12 | 12;04 | N aux quatre conditions Aucun biais significatif | AN à -10 | N | AN | N | N |

2.2.2. Matériel

2.2.2.1. Stimuli

Deux types de stimuli ont été retenus pour cette étude, verbaux et non verbaux, d'une durée de 250 ms incluant un temps de montée et de descente de 2,2 ms. Le spectre acoustique des stimuli est présenté dans les figures 2, 3, 4, 5 et 6. Tous les stimuli ont été étalonnés afin de s'assurer d'une pression sonore équivalente lors de l'expérimentation. Avec un niveau de présentation de 70 dB HL, les résultats se situaient à 84,7 dB SPL pour les stimuli non verbaux et entre 83,8 et 84 dB SPL pour les stimuli verbaux.

2.2.2.1.1 Stimuli verbaux

Les stimuli verbaux utilisés dans cette étude sont les deux paires de syllabes /ba/ et /da/ ainsi que /a/ et /da/. Ces stimuli permettent d'évaluer la capacité des enfants malentendants à traiter les informations linguistiques complexes ayant des caractéristiques acoustiques similaires ou différentes.

Les formants de la voyelle /a/ dans les trois syllabes sont identiques. Les premier, deuxième et troisième formants de la voyelle sont respectivement 832, 1 406 Hz et à 2 745 Hz. La transition entre la consonne et la voyelle du premier formant est identique pour les deux syllabes /ba/ et /da/. Ces deux syllabes ne peuvent donc être discriminées qu'à partir des transitions des deuxième et troisième formants dont la durée est de 60 ms. La paire /ba/ et /da/ sont, d'un point de vue acoustique, plus difficile à discriminer que la paire /a/ et /da/ puisque les deux syllabes ne diffèrent que

par le lieu d'articulation de la consonne, tandis que les syllabes /a/ et /da/ se différencient par la présence ou l'absence de la consonne.

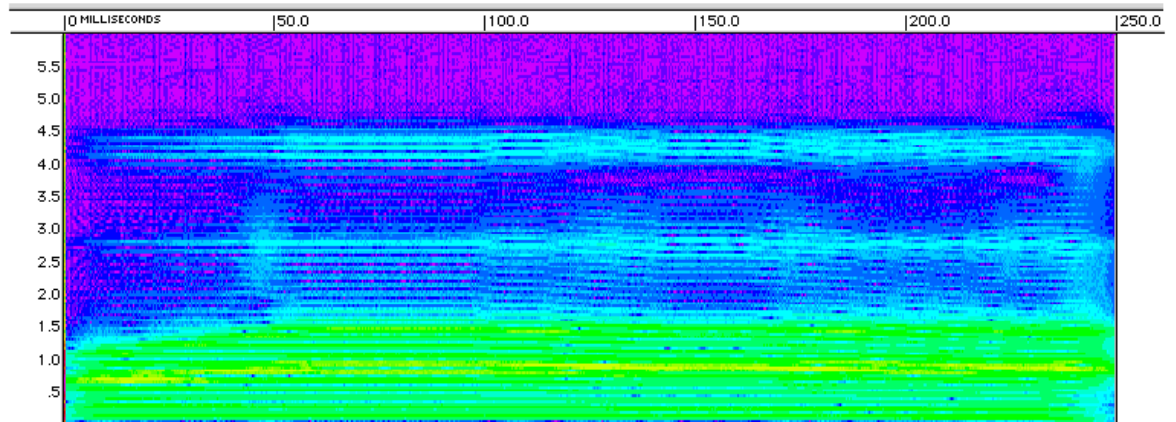


Figure 2. Spectre acoustique de la syllabe /ba/ représenté par l'étendue fréquentielle (en kHz) en fonction de sa durée (en millisecondes).

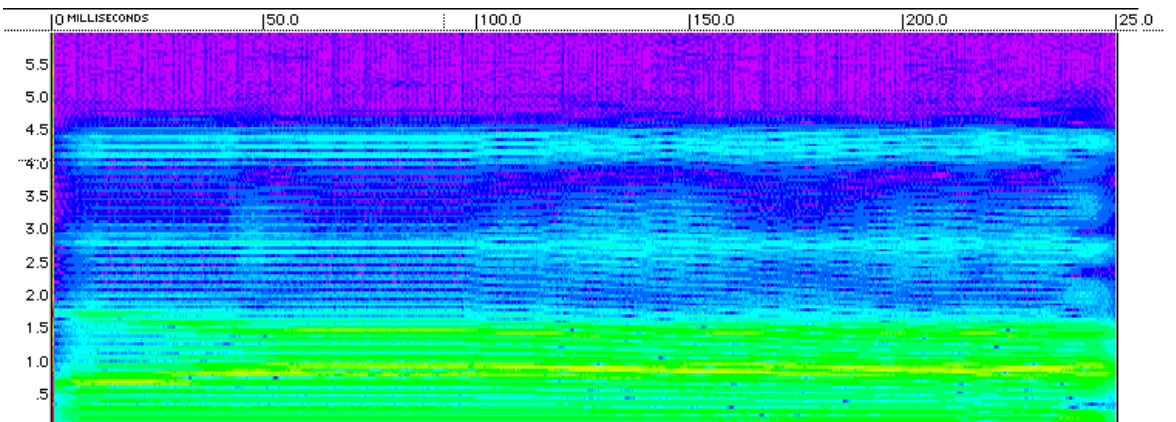


Figure 3. Spectre acoustique de la syllabe /da/ représenté par l'étendue fréquentielle (en kHz) en fonction de sa durée (en millisecondes).

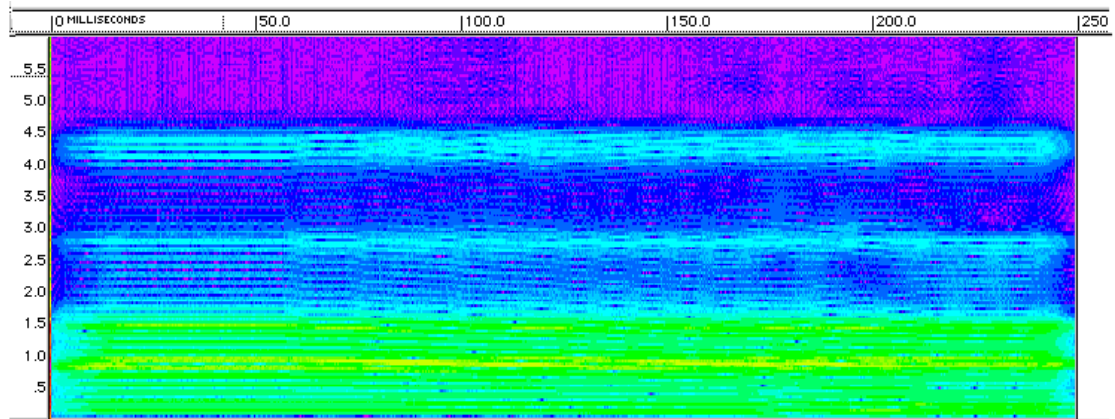


Figure 4. Spectre acoustique de la syllabe /a/ représenté par l'étendue fréquentielle (en kHz) en fonction de sa durée (en millisecondes).

2.2.2.1.2. Stimuli non verbaux

Les stimuli non verbaux ont été utilisés afin d'évaluer la capacité des enfants malentendants à traiter l'information acoustique complexe non linguistique. En s'inspirant de l'étude de Mody et al. (1997), les stimuli non verbaux ont été créés par ordinateur en utilisant les logiciels Dr Speech (1998) et Mitsyn (Henke, 1993). Ils ont été générés en respectant la transformation acoustique des syllabes /ba/ et /da/. Les stimuli non verbaux, complexes à traiter et similaires d'un point de vue acoustique, sont composés des deuxième et troisième formants de la voyelle ainsi que de la transition entre la consonne et la voyelle reliée à ces deux formants. La transition formantique du deuxième formant s'étend entre 1115 et 1281 Hz pour /ba/ et entre 1449 et 1281 Hz pour /da/. Les troisièmes formants, quant à eux, passait de 2535 Hz à 2510 Hz pour /ba/ et de 2556 à 2510 Hz pour /da/. Cette transformation respecte les

composantes de durée et d'intensité des syllabes et permis de créer deux stimuli qui ne sont pas linguistiques, mais qui demeurent acoustiquement complexes à traiter.

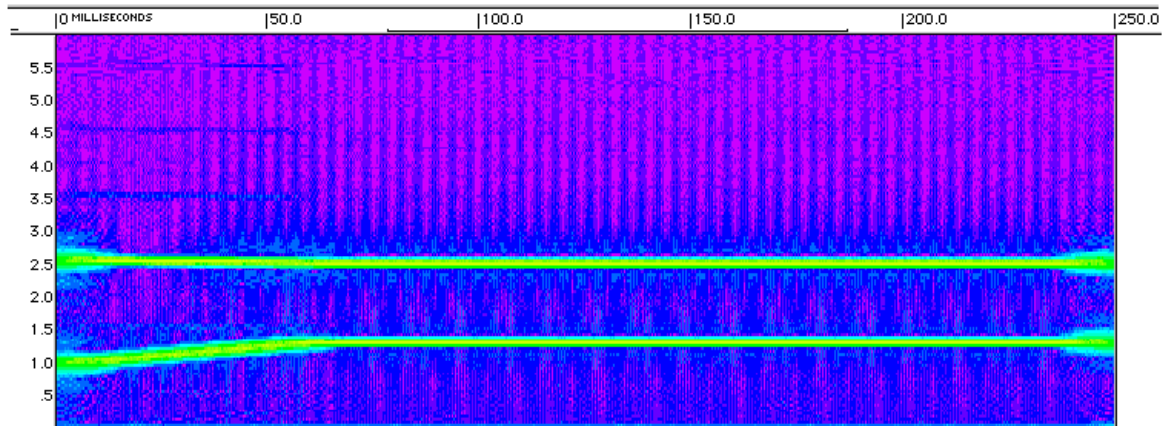


Figure 5. Spectre acoustique du stimulus non verbal /ba/ représenté par l'étendue fréquentielle (en kHz) en fonction de sa durée (en millisecondes).

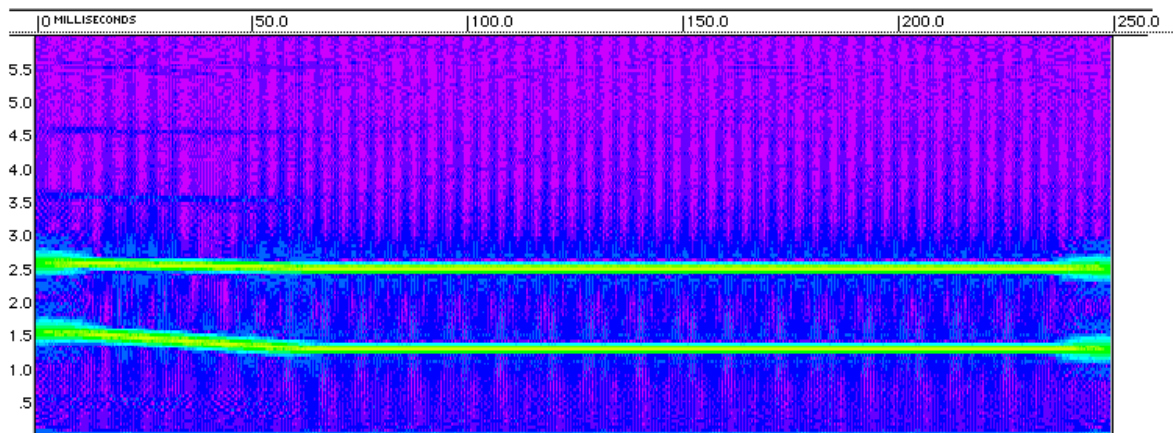


Figure 6. Spectre acoustique du stimulus non verbal /da/ représenté par l'étendue fréquentielle (en kHz) en fonction de sa durée (en millisecondes).

2.2.3. Équipements

Tous les stimuli ont été emmagasinés dans un ordinateur *Macintosh PowerBook G4*. La sortie audio de cet ordinateur a été branchée à un audiomètre portatif (Interacoustics, modèle AD229b), permettant ainsi de contrôler de façon précise le niveau de présentation des stimuli. Des écouteurs supra-auriculaires TDH 39 ont été connectés à l'audiomètre et placés sur les oreilles de l'enfant. Les stimuli ont été présentés à l'aide du logiciel Psychlab (1992) afin de contrôler le nombre d'éléments par séquence et l'intervalle interstimuli.

2.2.4. Déroulement

Deux séances de mesures comportementales ont été effectuées dans un endroit calme, au domicile ou au Centre de recherche du CHU Sainte-Justine, selon la préférence des participants ou de leurs parents.

La procédure expérimentale est présentée dans l'article 1. Toutefois, nous illustrons un résumé du déroulement de l'expérimentation comportementale dans le Tableau II et un exemple de l'ordre de présentation des 15 blocs de séquences du test d'OSA dans le Tableau III.

Tableau II. Résumé du déroulement de l'expérimentation comportementale lors des deux sessions.

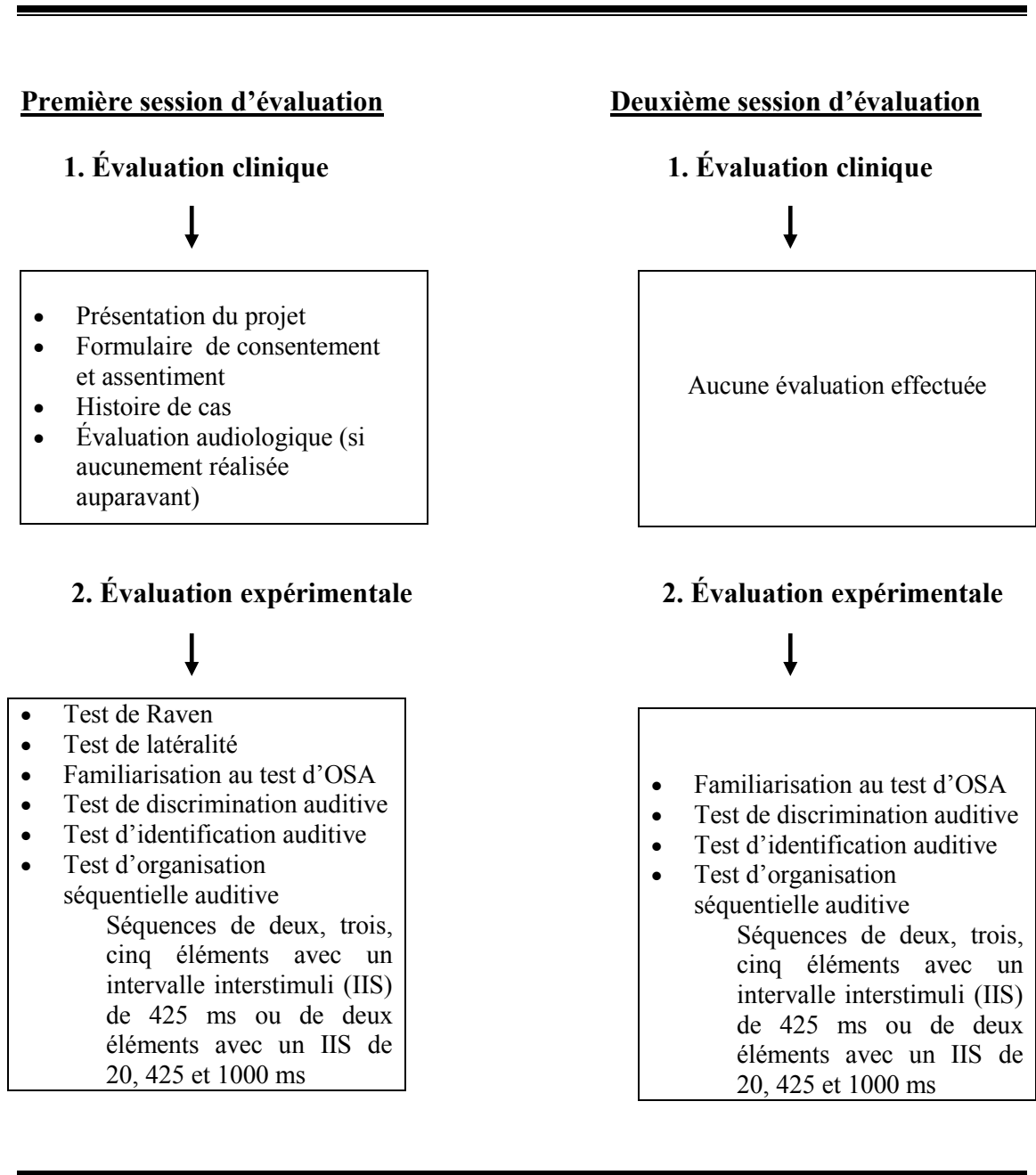


Tableau III. Exemple de l'ordre de présentation des essais pour les tâches d'organisation séquentielle auditive lors de la première rencontre. Le chiffre apparaissant en haut du carré représente le numéro de l'essai; le premier chiffre de la séquence indique le nombre d'éléments par séquence; les lettres indiquent le type de stimuli (Vb = verbaux /ba/ et /da/, Va = verbaux /a/ et /da/ et NV = non verbaux). Pour les séquences de deux éléments, la dernière série de chiffres indique la durée de l'intervalle interstimuli (20, 425 et 1k ms). Pour les séquences composées de plus de deux éléments, l'intervalle interstimuli était de 425 ms.

| | | | | |
|------------|--------------|-------------|------------|--------------|
| 1 3Vb | 2 2Va20 | 3 2Va1k | 4 3NV | 5 3Va |
| 6 2Vb1k | 7 2NV425 | 8 5NV | 9 2Vb20 | 10 2NV1k |
| 11 5Vb | 12 2Va425 | 13 2NV20 | 14 5Va | 15 2Vb425 |

2.3. Article 1

Auditory temporal organization in school-aged children with peripheral hearing loss

Amineh Koravand

École d'orthophonie et d'audiologie, Université de Montréal
and Centre de recherche, CHU Sainte-Justine

Benoît Jutras

École d'orthophonie et d'audiologie, Université de Montréal
and Centre de recherche, CHU Sainte-Justine

KEY WORDS: peripheral hearing loss, central auditory processing disorder, auditory sequential organization, temporal ordering, auditory identification

Corresponding author:

Amineh Koravand, Centre de recherche du CHU Sainte-Justine, 3175 Cote Sainte-Catherine, Montreal, Quebec, H3T 1C5

Abstract

Objective: The main objective was to assess auditory sequential organization (ASO) ability in children with and without hearing loss.

Methods: Forty children aged from 9 to 12 years, 12 with sensory hearing loss, 12 with central auditory processing disorder (CAPD), and 16 with normal hearing, participated in the study. In an ASO task, they were asked to recall two, three, and five verbal and nonverbal stimuli with an interstimulus interval (ISI) of 425 ms as well as sequences of two elements with an ISI of 20 or 1000 ms.

Results: No significant difference was found between the group of children with hearing loss and the two other groups on nonverbal stimuli in all testing conditions. Regardless of ISI duration and number of elements in the sequences, children with hearing loss had significantly fewer correct responses than children with normal hearing or with CAPD on the verbal stimuli /ba-/da/. Children with hearing loss performed significantly better than children with CAPD on the verbal stimuli a-/da/ when the number of elements in the sequences varied.

Conclusions: Children with sensory hearing loss showed impaired ASO when recalling verbal stimuli (/ba-/da/). Results suggest that hearing loss can induce a specific pattern of central auditory processing disorder.

Introduction

The effects of sensory hearing loss on auditory abilities have been largely investigated. Individuals with sensory hearing loss have shown diminished temporal resolution and/or temporal integration abilities (Florentine et al., 1993; Fitzgibbons & Gordon-Salant, 1987; Glasberg & Moore, 1989; Nelson & Dwyer, 1997). Moreover, Feng et al. (2010) recently demonstrated that adults with high-frequency hearing loss performed lower than age-matched individuals with normal hearing acuity on temporal resolution tasks (amplitude modulation detection and gap detection), even though stimuli were in the normal hearing sensitivity range. These results suggest that some central auditory capacities are affected by peripheral hearing loss.

Studies have also used auditory sequential organization (ASO) tasks with simple and complex stimuli to explore the relationship between the peripheral and central auditory systems (Jutras & Gagné 1999; Koravand et al., 2010; Ling 1975; Rose & Moore, 1997). ASO capacity plays an important role in speech perception (Hirsh, 1959) and is a function of the central auditory system (Pinheiro & Musiek, 1985). ASO refers to the ability to process all the elements of an acoustic sequence in the correct order (Leroux et al., 1993). Ling (1975) used verbal and nonverbal stimuli to assess ASO in children with and without sensory hearing loss. They found that children with hearing loss scored lower than children with normal hearing on sequences of verbal stimuli comprising two, three, and four elements. On nonverbal sequences, children with hearing loss (from 6 to 14 years old) performed better than 5-year-olds with normal hearing but lower than 9-year-olds with normal hearing. However, these results do not

indicate whether the poorer performance of children with hearing loss on ASO tasks was due to reduced short-term memory ability.

This question was investigated by Jutras & Gagné (1999). They used verbal (/ba/ and /da/) and nonverbal (a 1 kHz pure tone and a wide band noise) stimuli to assess ASO ability in 48 children with and without sensory hearing loss. Overall, children with hearing loss performed significantly lower than children with normal hearing on verbal stimuli (/ba/ and /da/) only. These results suggest that children with hearing loss have more difficulty with perceptual processes than with short-term memory. Their poorer performance could be related to the characteristics of the verbal stimuli (/ba-/da/), which were more acoustically similar and yet more complex to process than nonverbal stimuli.

To explore these hypotheses, Koravand et al. (2010) assessed ASO in 26 children: 13 with normal hearing and 13 with sensory hearing loss. Children performed ASO tasks involving sequences of two, three, and five verbal (/ba-/da/ and /a-/da/) and nonverbal stimuli (acoustic transformation of /ba-/da/) with an interstimulus interval (ISI) of 425 ms. They also reproduced sequences of two elements with variable ISI of 20 and 1000 ms. Children with hearing loss performed significantly lower than controls, mainly in recalling verbal sequences with complex and similar acoustic features (/ba-/da/). This suggests that ASO difficulties in children with hearing loss are not exclusively attributable to speech perception problems. The lower overall performance on /ba-/da/ could be instead due to an interaction between the complexity and similarity of the verbal stimuli (Koravand et al., 2010), suggesting a specific auditory processing disorder. One way to further explore these problems would be to assess children with a

central auditory processing disorder (CAPD) on ASO tasks. Children with CAPD have difficulty processing auditory information in the central nervous system despite normal hearing sensitivity (ASHA 2005), and would therefore be expected to show poor performance on ASO tasks. Comparing their ASO results to those of children with hearing loss could help us better understand the relationship between the peripheral and auditory central systems.

The main objective of the present study was to examine the nature of problems children with hearing loss have on ASO tasks. If children with hearing loss have specific CAPD, as suggested in previous studies, their performance pattern would differ significantly from that of children with CAPD, whereas performance comparable to that of children with CAPD would suggest a central auditory processing deficit not specific to hearing loss.

Materials and Methods

Participants

Three groups of 9- to 12-year-old French-speaking children participated in the study: Group 1 – 12 with sensory hearing loss (mean age: 11 years, 2 months; SD: ± 10 mo); Group 2 – 12 with CAPD (mean age: 10 years, 11 months; SD: ± 11 mo); and Group 3 – 16 with normal hearing (mean age: 11 years; SD: ± 10 mo). All children with hearing loss were age- and gender-matched to children with normal hearing and with CAPD. All participants in groups 2 and 3 had normal hearing detection threshold at 15 dB HL or less for octave frequencies between 500 Hz and 8 kHz, bilaterally (re: ANSI, 1996). Mean hearing sensitivity threshold for children with sensory hearing loss, based on the

average of 500, 1000, and 2000 Hz pure-tone thresholds, was within the range of mild to moderately severe hearing loss, according to Clark's (1981) classification (Table 1). All children with hearing loss had used their hearing aids regularly for at least four years prior to the experiment, except for one child who had 3 years and 11 months of experience with hearing aids. Children with CAPD had previously been diagnosed with central auditory processing disorder. The test battery included the French adaptation of the Staggered Spondaic Word Test (Rudmin & Normandin, 1983), the French adaptation of the Synthetic Sentence Identification with Ipsilateral Competing Message (Lynch & Normandin, 1983), the Pitch Pattern Test, (Musiek, 1994), the Duration Pattern Test (Musiek, 1994), and the Random Gap Detection Test (Keith, 2000). According to Neijenhuis et al. (2004), hearing loss can influence performance on central auditory tests. Consequently, children with hearing loss did not perform these tests. All children had normal tympanograms (admittance curve with a single peak between +50 and -100 daPa using a 226 Hz probe tone) and no history of otologic or neurologic disorder. All children were right-handed. The study was approved by the Ethics Committee of the CHU Sainte-Justine.

Insert Table 1

Materials and Equipment

Two stimulus types, verbal and nonverbal, were used. The two verbal pairs consisted of two synthetic syllables: /ba-/da/ and /a-/da/. Stimuli were selected from the CD-ROM *Speech Production and Perception I* (Sensimetrics Corporation, 1994). The pair of syllables /a-/da/ was used because it requires complex acoustical processing but is

easier to differentiate than the pair /ba-/da/. The use of two different categories of verbal stimulus can provide valuable information on the perceptual processing of speech in children with sensory hearing loss.

The nonverbal stimuli consisted of synthesized transformations of the verbal stimuli /ba-/da/, each composed of two sine waves identical to those of the center frequencies of the second and third formant frequencies in the synthetic /ba-/da/ (Mody et al., 1997). However, they differed perceptually from their corresponding speech sounds. Use of these stimuli can provide supporting information on how complex acoustic signals are processed without the contribution of speech processing. Nonverbal stimuli were generated using Dr. Speech (Tiger DSR Inc, 1998) and Mitsyn (Henke, 1993) software. Verbal and nonverbal stimuli 250 ms in duration with 2.2 ms rise and fall times were created for this study. Stimuli were stored on a Macintosh portable computer (PowerBook G4) connected to an audiometer (Madsen Itera). Stimuli were presented to the right ear through a TDH-39 earphone. Stimulus sequences and inter-stimulus intervals (ISI) were controlled by PsychLab (1992) software.

Procedure

The participants and their parents gave their consent to participate in the study. All children participated in a minimum of two sessions. During the first session, children completed the Colored Progressive Matrices Test (Raven, 1956), which assesses nonverbal reasoning ability through 36 multiple choices involving abstract reasoning. For each test item, participants were asked to identify, from a closed set of six, the missing segment required to complete a larger image pattern (Raven, 1956). Children also completed a hearing detection threshold test (if these results were not already

available) and a laterality test based on an adapted protocol from De Agostini & Dellatolas (1988).

Once all the prerequisites tests were completed, discrimination, identification, and ASO tests were conducted. For all experimental conditions, stimuli were presented by earphone to the right ear at 55 dB HL in children with normal hearing and with CAPD. For children with hearing loss, the stimulus presentation was adjusted to a level that the child found comfortable, between 75 and 100 dB HL (Table 1). Stimuli were presented to the right ear by earphone because individuals with hearing loss generally present a right ear advantage for auditory pattern recognition (Stocker, 1980).

1. Discrimination test

Children were seated at a table facing a response box equipped with two identical buttons. They were first trained to press a button to respond separately to each of the verbal and nonverbal stimulus pairs. For example, they were taught to associate the first button with the similar pair (/ba/-/ba/ or /da/-/da/) and the second button with the different pair (/da/-/ba/ or /ba/-/da/). Fifteen stimulus pairs were presented randomly. To progress to the identification test, children were required to correctly respond to 13 of the 15 pairs.

2. Identification test

Children were asked to identify a randomly presented stimulus by pressing the correct button on the response box after each presentation. Each button was associated with a specific verbal or nonverbal stimulus. For example, the first button was associated with /ba/ and the second with /da/. Twenty stimuli (10 /ba/ and 10 /da/) were presented randomly. An identification test criteria (at least 90% correct responses) ensured that

all children were able to perceive and recognize the verbal and nonverbal stimuli before presenting them in sequence. No feedback was provided at this stage.

3. Auditory sequential organization (ASO) test

Children completed the following two tasks with both verbal and nonverbal stimuli: 1) ordered reproduction of sequences of two, three, and five elements with ISI of 425 ms; and 2) ordered reproduction of sequences of two elements with ISI duration of 20 and 1000 ms. All children completed 15 blocks of 10 different sequences, with the number of stimuli presented in sequence held constant across blocks. Blocks and sequences were presented in random order across children. To ensure reliability, a second session was conducted where children repeated the stimulus–button association task, discrimination test, identification test, and ASO test with verbal and nonverbal stimuli. When the difference between results on the first and second session for a given experimental condition was greater than 20%, children completed a third trial block.

Results

Raven’s Colored Progressive Matrices

Mean group score on the nonverbal reasoning test was above the 80th percentile, ranging from the 75th to the 95th percentile, according to test norms (Raven, 1956). Mean group score for children with normal hearing, hearing loss, and CAPD was 35.1 (SD = 1.4), 34.3 (SD = 1.6), and 34.4 (SD = 1.8) out of 36, respectively. Results showed no significant difference between the three groups [$F(2, 37) = 1.23, p = 0.30$].

Discrimination and Identification Tests

Performance on the discrimination and identification tests was determined by calculating the average number of correct responses in the first and the second sessions. All children met the criteria for the discrimination and identification tasks with the three stimulus pairs.

Auditory Sequential Organization Test

For each experimental OSA condition, the average number of correct responses was calculated from the data on the first and second sessions. If a third trial was performed by a given child in an experimental condition, the average number of correct responses was calculated from the two out of three trial blocks with the closest performance. Twelve children with normal hearing, ten children with CAPD, and twelve with hearing loss were required to perform a third block of trials for at least one experimental condition.

A three-way ANOVA was performed with the between factor Group and within factors Stimulus Type and Number of elements per sequence or ISI duration, with repeated measures for Stimulus Type and Number or ISI duration. Data were previously submitted to an arcsine transform.

Number of elements per sequence

Results on verbal and nonverbal sequences of two, three, and five elements correctly reproduced by the three groups are presented in Figure 1. A three-way ANOVA indicated significant effects of all three main factors: Group [$F(2, 37) = 3.4, p < .05$]; Type [$F(2, 74) = 10.5, p < .001$], and Number (two, three, and five elements per

sequence) [$F(1.65, 61.11) = 234, p < .001$]. The two-way interactions Group x Type [$F(4, 74) = 7, p < .001$] and Number x Type [$F(3.2, 118.4) = 5.6, p < .001$] were significant. However, no significant differences were found for the third two-way interaction Group x Number [$F(4, 74) = 1.8, p = .13$] or for the three-way interaction Group x Type x Number [$F(8, 148) = .93, p = .5$].

An analysis of simple effects for the significant interaction Group x Type showed a significant Group effect for the verbal stimulus pairs /ba-/da/ [$F(2, 37) = 6.3, p < .05$] and /a-/da/ [$F(2, 37) = 4.62, p < .001$]. However, no significant difference between groups was found for nonverbal stimuli [$F(2, 37) = 1.76, p = .19$].

For the verbal stimuli /ba-/da/, a *t* test with Bonferroni correction ($p < .016$) indicated that children with hearing loss performed significantly lower than children with normal hearing [$t(26) = 3.43, p < .016$]. No significant difference between children with CAPD and with normal hearing was found [$t(26) = 1.55, p = .13$] or between children with CAPD and with hearing loss [$t(22) = 1.91, p = .07$]. For the verbal stimuli /a-/da/, the statistical analysis showed that children with CAPD performed significantly lower than children with normal hearing [$t(26) = 2.66, p < .016$] and with hearing loss [$t(22) = 2.6, p < .016$]. No significant difference was found between children with hearing loss and with normal hearing [$t(26) = 0.09, p = .93$].

An analysis of simple effects for the significant interaction Type x Number revealed a significant difference between verbal and nonverbal stimuli for sequences of two [$F(2, 117) = 7.16, p < .001$] and three elements [$F(2, 117) = 4.35, p < .01$]. For sequences of five elements, this difference was not significant [$F(2, 117) = .98, p = .4$]. For the two-element sequence, children performed significantly better on the verbal pair /a-/da/

than on nonverbal stimuli [$t(78) = 4.24, p < .016$]. No significant difference was found between the verbal pairs /ba-/da/ and /a-/da/ [$t(78) = 1.6, p = .11$]. A trend was observed between the verbal pair /ba-/da/ and nonverbal stimuli [$t(78) = 1.9, p = .052$]. For the three-element sequence, a statistical analysis (t test) revealed significantly better scores with the verbal pair /a-/da/ than with nonverbal stimuli [$t(78) = 3.12, p < .016$]. No significant differences were found between trial blocks comprising three verbal /ba-/da/ and nonverbal elements [$t(78) = 0.6, p = .5$] or between blocks of the verbal pairs /a-/da/ and /ba-/da/ [$t(78) = 2.14, p = .035$].

Insert Figure 1

Interstimulus interval duration

Results on trial blocks involving sequences of two nonverbal stimuli or two verbal stimuli are presented in Figure 2 as a function of ISI duration (20, 425, and 1000 ms). A three-way ANOVA (Group, Type of stimuli, and ISI duration) with repeated measures for Type and ISI was performed. Results indicated significant effects of all three main factors: Group [$F(2, 37) = 4.3, p < .05$], Type [$F(2, 74) = 20.04, p < .001$], and ISI duration (20, 425, and 1000 ms) [$F(1.54, 56.92) = 23.5, p < .001$]. Significant effects were obtained for the double interaction Group x Type only [$F(4, 74) = 7.5, p < .001$]. The two-way interactions ISI x Type [$F(4, 148) = 1.9, p = .12$] and Group x ISI [$F(4, 74) = 1.4, p = .23$] and the three-way interaction Group x Type x ISI [$F(4, 148) = 1.2, p = .31$] were not significant.

An analysis of simple effects for the significant interaction Group x Type showed a significant group effect for the verbal stimuli /ba-/da/ [$F(2, 37) = 7.93, p < .001$] and

/a/-/da/ [$F(2, 37) = 3.70, p < .05$]. However, a trend was found between groups for nonverbal stimuli, [$F(2, 37) = 3.24, p = .05$].

For the verbal stimuli /ba/-/da/, a statistical analysis with Bonferroni correction ($p < .016$) indicated that children with hearing loss performed significantly lower than children with CAPD [$t(22) = 2.91, p < .01$] and with normal hearing [$t(26) = 3.63, p < .001$]. No significant difference was found between children with CAPD and controls [$t(26) = 0.74, p = .46$]. For the verbal stimuli /a/-/da/, a statistical analysis (t test) revealed significantly lower performance in children with CAPD compared to controls only [$t(26) = 2.66, p < .016$]. No significant difference was found between controls and children with hearing loss [$t(26) = 0.52, p = .61$] or between children with CAPD and with hearing loss [$t(22) = 1.86, p = .07$].

Insert Figure 2

Discussion

The main objective of this study was to investigate the nature of ASO problems in children with hearing loss. Results showed that they performed significantly lower than children with normal hearing on recalling verbal sequences with complex and similar acoustic features (/ba/-/da/). Their performance on recalling the verbal pair /a/-/da/ and nonverbal stimuli was similar to that of normal-hearing peers. These results replicate those obtained by Koravand et al. (2010), Jutras & Gagné (1999), and Dawson, Busby, McKay et al. (2002). Moreover, our main findings on the performance of children with hearing loss compared to that of children with CAPD support the hypothesis that

children with sensory hearing loss have a specific central auditory dysfunction. Their performance patterns on ASO tasks differed from those of children with CAPD: performance of children with hearing loss was modulated by stimulus type rather than testing condition. They also performed lower with the verbal pair /ba-/da/ than with the two other stimulus pairs in all ASO test conditions. In contrast, the performance of children with CAPD was influenced more by the number of elements per sequence than by stimulus type: they performed dramatically lower when the number of elements was increased from two to five, independently of the stimulus pairs used.

Koravand et al., (2010) advanced three hypotheses to explain the specific problems of children with hearing loss on the /ba-/da/ pair in ASO tasks: a temporal, an acoustic, and a linguistic hypothesis. The results of the present study shed new light on these hypotheses and contribute to refine them. According to the temporal hypothesis, the auditory information processing speed could have been slower in children with hearing loss because they have difficulty performing tasks involving a very short ISI duration (i.e., 20 ms) between two stimuli. However, this hypothesis is not supported by the present findings. In fact, the results of this study show no significant difference between the performance of children with hearing loss and that of the other children on ASO tasks with an ISI of 20 ms. This discrepancy between the two studies could be explained by a maturational factor. Children with hearing loss were older in the present study: 11 years and 2 months compared to 9 years and 8 months in the previous study. Processing speed might have been more affected in younger children with hearing loss than in older children. If so, there could be a catching-up effect as these children get

older. For instance, Jutras & Gagné (1999) showed a developmental effect when children performed ASO tasks.

The acoustical hypothesis refers to how the auditory system deals with the acoustic content of the stimuli. The verbal stimuli had three formants (and three formant transitions between the consonant and the vowel), whereas the nonverbal stimuli had only two. Because the verbal stimuli were more loaded acoustically than the nonverbal stimuli, the central auditory system of children with hearing loss had to expend more effort to process the verbal stimuli, whereas processing the acoustic information of the nonverbal stimuli was relatively effortless (Koravand et al., 2010). As reported by Rabbitt (1968), in adverse listening situations, when an effort is needed to identify a stimulus, the individual might have problems performing a task because fewer processing resources are available to identify the next stimulus. This is known as the “effortfulness” hypothesis. Nevertheless, the findings of the present study support the acoustic hypothesis, because children with hearing loss performed lower with the verbal /ba/-/da/ pair than with the nonverbal pair.

In their linguistic hypothesis, Koravand et al. (2010) suggested that the boundaries for a clear distinction between /ba/ and /da/ are less well defined in children with hearing loss than in children with normal hearing. This hypothesis can be related to the lexical neighborhood density model, which refers to the number of items activated in the lexical repertoire when a given word is heard (Luce & Pisoni, 1998). A word containing many lexical neighbors is qualified as dense. For example, the target word *cat* is in competition with several words that differ by only one phoneme, such as *bat*, *cap*, *cut*, *scat*, and *at* (Krul et al., 2010). In contrast, a sparse neighborhood refers to a

restricted number of words that are liable to be in competition with a specific word (Krul et al., 2010), such as thump, tea, and lost. As expected, individuals perform significantly better on word recognition tests in a sparse than in a dense neighborhood, based on the fine acoustic–phonetic features of the word (Krul et al., 2010). Children with hearing loss might have trouble with /ba/ and /da/ because when they hear either one of the two syllables, both syllables are often activated. Their lexicon would therefore feature more competition than for children with normal hearing and for other stimulus pairs.

Conclusions

Children with hearing loss showed a different performance pattern on ASO tasks compared to children with CAPD and children with normal auditory functions. Results suggest that ASO ability in these children is impaired for specific verbal stimuli. However, the degree of hearing loss varied across the children. Because the majority had moderate to moderately severe hearing loss, results can not be generalized to all children with hearing loss. Further studies could determine how the degree of hearing loss influences the performance of groups of children classified by deafness severity.

Further studies are also needed to verify the above-mentioned hypotheses. For example, to validate the acoustic hypothesis, the number of formants could be changed, and to explore the linguistic hypothesis, other verbal stimuli could be used, such as other minimal pairs with opposed occlusive consonants (e.g., /ga/ and /da/). Results could provide insight into specific listening problems in children with hearing loss.

Furthermore, research could be conducted to develop a clinical protocol to assess ASO ability in children with hearing loss. This protocol should include simple and complex tests, such as discrimination, identification, and temporal ordering tests with verbal and nonverbal stimuli. The results would help identify specific auditory abilities and disabilities in children with hearing loss on ASO tasks, and would lead to the development of appropriate interventions. Moreover, the test protocol of the present study should be modified to reduce the testing time in clinical settings. Children in all three groups demonstrated almost similar performance using 425 ms and 1000 ms ISI and with two- and three-element sequences. Accordingly, three-element sequences or sequences with 1000 ms ISI should be excluded from the test protocol.

Future studies could also use objective tools such as electrophysiological measures to examine the basic neurophysiological processes underlying central auditory deficits in children with hearing loss. These measures could provide useful clinical tools to identify central auditory disabilities in young children with hearing loss.

Acknowledgments

The first author is grateful to the *Fonds de la recherche en santé du Québec* (FRSQ) and the Research Centre of CHU Sainte-Justine for their financial support through scholarships. This research was funded in part by the Canadian Institutes of Health Research, the *Réseau provincial de recherche en adaptation-réadaptation* (REPAR), the Research Centre of CHU Sainte-Justine, and The Hearing Foundation of Canada. The authors are grateful to the children and their parents, who invested considerable time and effort to participate in this research project. We are also very grateful to Marie-Michèle Béliveau for her assistance in conducting the various project phases.

References

American Speech-Language-Hearing Association, (2005). Central auditory processing disorders. Retrieved March 3, 2010 from web site:

<http://www.asha.org/docs/html/tr2005-00043.html>.

American National Standards Institute. (1996). *Specification for audiometers* (ANSI S3.6-1996). New York, NY: Author.

Clark, JG. (1981). Uses and abuses of hearing loss classification. *ASHA*, 23, 493–500.

Dawson, PW., Busby, PA., McKay, CM., et al (2002). Short-term memory in children using cochlear implants and its relevance to receptive language. *Journal of Speech Language and Hearing Research*, 45, 789-801.

De Agostini, M., & Dellatolas, G. (1988). Une épreuve simple pour évaluer la préférence manuelle chez l'enfant à partir de 3 ans. *Enfance*, 41, 139-147.

Dempsey, JJ., & Maxon, AB. (1982). Temporal integration functions in hearing-impaired children. *Ear & Hearing*, 3(5), 271-273.

Dr. Speech (1998). [computer program]. Version 4.20. USA: Tiger DRS Inc.

Feng, Y., Yin, Sh., Kiefte, M. & Wang, J. (2010). Temporal resolution in regions of

normal hearing and speech perception in noise for adults with sloping high-frequency hearing loss. *Ear & Hearing*, 31 (1), 115–125.

Fitzgibbons, P.J., & Gordon-Salant, S. (1987). Minimum stimulus levels for temporal gap resolution in listeners with sensorineural hearing loss. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 81, 1542-1545.

Florentine, M., Fastl, H., & Buus, S. (1998). Temporal integration in normal hearing, cochlear impaired, and impaired simulated by masking. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 84, 195-203.

Glasberg, B.R., & Moore, B.C.J. (1989). Psychoacoustic abilities of subjects with unilateral and bilateral cochlear hearing impairments and their relationship to the abilities to understand speech. *Scandinavian Audiology, Supplement*, 32, 1-25.

Hirsh, I.J. (1959). Auditory perception of temporal order. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 31, 759-767.

Jutras, B., & Gagné, J.P. (1999). Auditory sequential organization among children with and without a hearing loss. *Journal of Speech Language and Hearing Research*, 42, 553-567.

Keith, R.W. (2000). Random Gap Detection Test, Auditec of St Louis Ltd.

Koravand, A., Jutras, B., & Roumy, N. (2010). Peripheral hearing loss and auditory temporal-ordering ability in children. *International Journal of Pediatric Otorhinolaryngology*, *74*, 50-55.

Krull, V., Choi, S., Kirk, K., Prusick, L. & French, B. (2010). Lexical effects on spoken word recognition in children with normal hearing. *Ear & Hearing*, *31* (1), 102–114.

Leroux, T., Lalonde, M., Désilets, F., et al (1993). Proposition d'une nomenclature enrichie des capacités liées au sens et à la perception-audition. *Réseau int CIDIH*, *5 & 6*, 35-39.

Ling, A.H. (1975). Memory for verbal and nonverbal auditory sequences in hearing-impaired and normal-hearing children. *Journal of the American Audiology Society*, *1*, 37-45.

Luce, P.A., & Pisoni, D.B. (1998). Recognizing spoken words: The neighborhood activation model. *Ear & Hearing*, *19* (1), 1–36.

Lynch, A. & Normandin N. (1983). SSI: Élaboration d'une version française et application auprès d'une population d'enfants avec troubles d'apprentissage. Unpublished Master's thesis, University of Montreal, Canada.

Henke W (1993), Mitsyn Software program. Boston: Massachusetts Institute of Technology.

Mody, M., Studdert-Kennedy, M., & Brady, S. (1997). Speech perception deficits in poor readers: Auditory processing or phonological coding? *Journal of Experimental Child Psychology*, 64, 199-231.

Musiek, F.E. (1994). Frequency (pitch) and duration pattern tests, *Journal of the American Academy of Audiology*, 5, 265—268.

Nelson, PB., & Dwyer Thomas, S. (1997). Gap detection as a function of stimulus loudness for listeners with and without hearing loss. *Journal of Speech Language and Hearing Research*, 40, 1387-1394.

Pinheiro, ML., & Musiek, F.E. (1985). Sequencing and temporal ordering in the auditory system. In FE. Musiek, ML. Pinheiro (eds.), *Assessment of central auditory dysfunction: Foundations and clinical correlates* (pp, 219-238). Los Angeles: Williams & Wilkins.

PsychLab. (1992). Software. Version 1. Montreal, Canada: Teren Gum.

Rabbitt, P.M.A. (1968). Channel capacity, intelligibility and immediate memory. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 20, 241–248.

Raven JC. (1956). *Colour Progress Matrices*. London: H.K. Lewis & Co. Ltd.

Reed, M.A. (1989). Speech perception and the discrimination of brief auditory cues in reading-disabled children. *Journal of Experimental Child Psychology*, 48, 270–292.

Rose, MM., & Moore BCJ. (1997). Perceptual grouping of tone sequences by normally hearing and hearing impaired listeners. *Journal of the Acoustical Society of America*, 102, 1768-1778.

Rudmin, F., & Normandin, N. (1983). Experimental dichotic tests in French modeled on SSW design. *Human Communications Canada*, 3, 348-360.

Sensimetrics Series in Human Communication: Speech Production and Perception I. (1994). [CD-ROM]. Edmonds, WA: Sensimetrics.

Stocker RG. (1980). Temporal pattern recognition and speech perception by the hearing impaired. Unpublished thesis, McGill University, Montreal, Quebec, Canada.

Table Caption

Table 1. Nine- to twelve-year-old children with hearing loss: age (years; months); age of hearing aid fitting (H/A); sex and hearing loss measured in the right ear at 250 to 8000 Hz; and level of stimuli presentation (LP) in dB HL.

| Children | Age | H/A | Sex | Hearing threshold (dB HL) | | | | | | LP |
|----------|-------|------|-----|---------------------------|-----|------|------|------|------|-----|
| | | | | 250 | 500 | 1000 | 2000 | 4000 | 8000 | |
| 1 | 12;04 | 8;00 | F | 50 | 55 | 55 | 30 | 40 | 60 | 80 |
| 2 | 9;08 | 4;03 | M | 60 | 65 | 70 | 75 | 65 | 40 | 95 |
| 3 | 12;00 | 7;00 | M | 40 | 50 | 55 | 65 | 45 | 90 | 90 |
| 4 | 12;02 | 2;00 | M | 25 | 45 | 65 | 80 | 70 | 75 | 95 |
| 5 | 9;11 | 6;00 | F | 30 | 30 | 40 | 40 | 50 | 50 | 75 |
| 6 | 12;02 | 3;10 | F | 25 | 25 | 45 | 65 | 55 | 55 | 80 |
| 7 | 10;06 | 2;04 | F | 40 | 40 | 45 | 50 | 55 | 50 | 80 |
| 8 | 11;04 | 3;06 | F | 30 | 50 | 65 | 65 | 70 | 70 | 90 |
| 9 | 11;07 | 3;00 | M | 65 | 55 | 55 | 55 | 60 | 70 | 90 |
| 10 | 11;05 | 4;00 | F | 35 | 45 | 70 | 75 | 80 | 85 | 90 |
| 11 | 10;04 | 2;03 | M | 60 | 60 | 70 | 70 | 60 | 75 | 100 |
| 12 | 11;04 | 7;03 | F | 25 | 40 | 45 | 60 | 55 | 40 | 95 |

Figure Captions

Figure 1. Mean number and standard deviation (bars) of correctly reproduced sequences by 16 children with normal hearing (NH), 12 children with central auditory processing disorder (CAPD), and 12 children with hearing loss (HL) as a function of the number of elements per sequence. A maximum of ten sequences are presented. Data are shown for the three stimulus pairs: sequence of two, three, and five verbal syllables /a/-/da/ (2Va), (3Va), and (5Va); sequence of two, three, and five verbal syllables /ba/-/da/ (2Vb), (3Vb), and (5Vb); and sequence of two, three, and five nonverbal stimuli (2NV), (3NV), and (5NV).

Figure 2. Mean number and standard deviation (bars) of correctly reproduced sequences by 16 children with normal hearing (NH), 12 children with central auditory processing disorder (CAPD), and 12 children with hearing loss (HL) as a function of the interstimulus interval (ISI) duration. A maximum of ten sequences are presented. Data are shown for the sequence of two elements with the three pairs of stimuli: verbal /a/-/da/ with 20, 425, and 1000 ms ISI (Va-20), (Va-425), and (Va-1K); verbal /ba/-/da/ with 20, 425, and 1000 ms ISI (Vb-20), (Vb-425), and (Vb-1K); and nonverbal /ba/-/da/ with 20, 425, and 1000 ms ISI (NV-20), (NV-425), and (NV-1K).

Figure 1

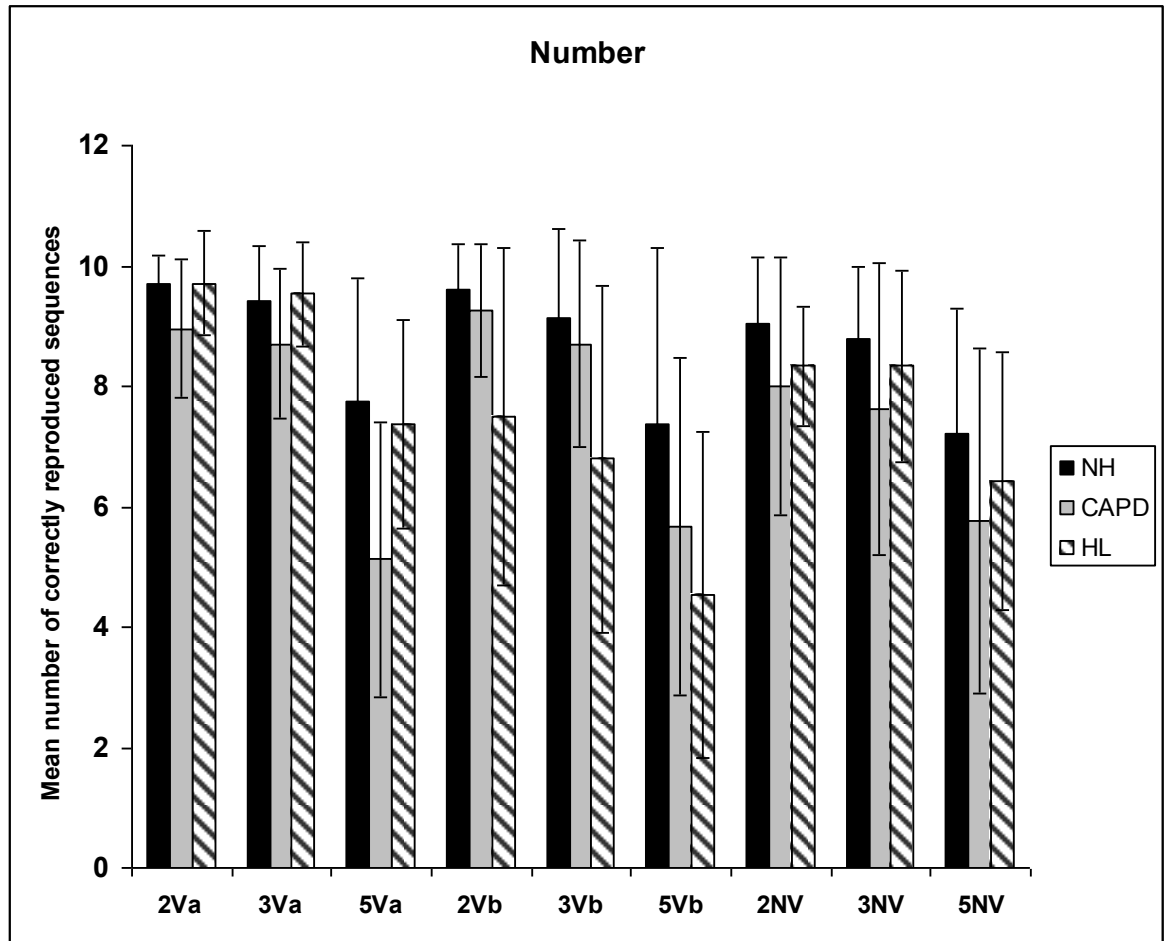
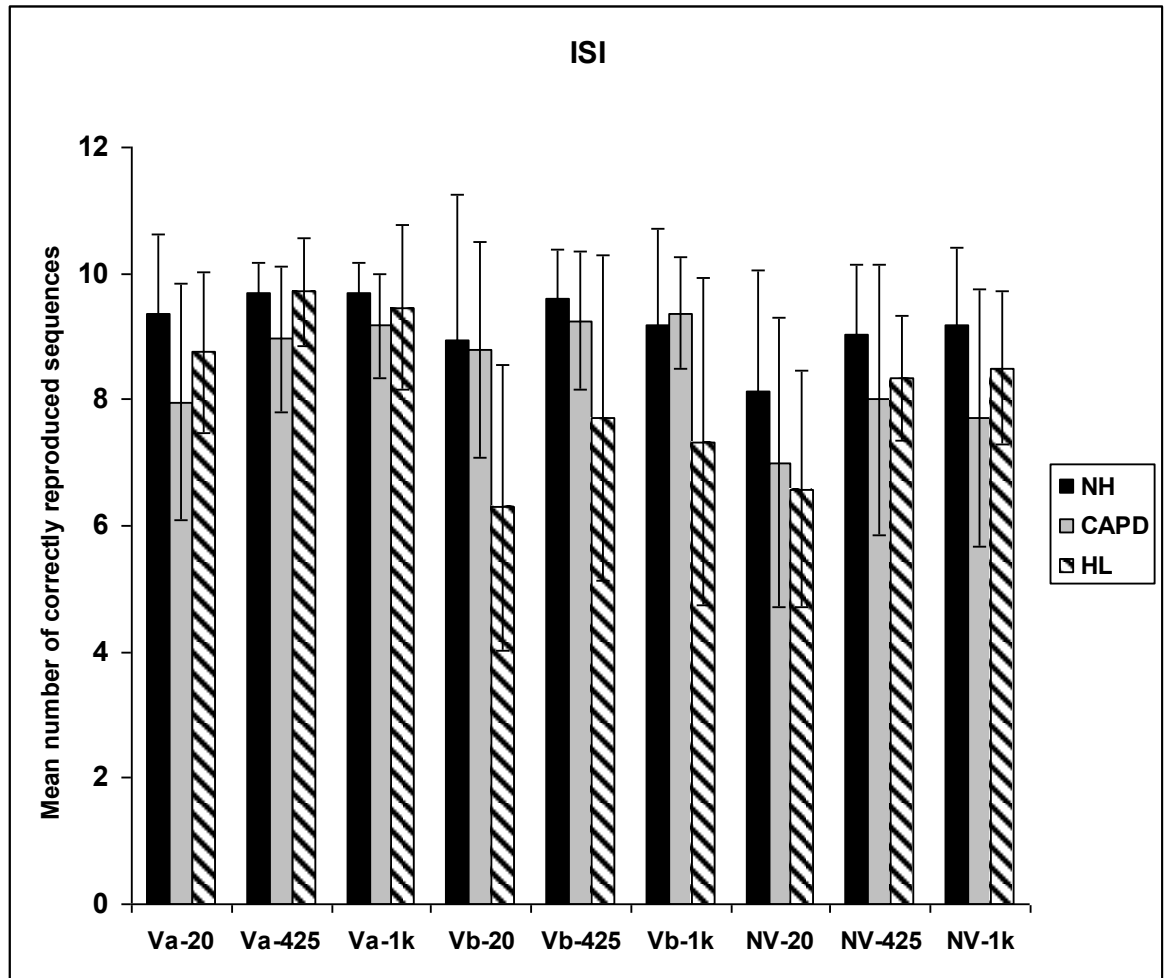


Figure 2



Chapitre 3

3.1. Réponses neurophysiologiques à des stimulations auditives chez les enfants malentendants

3.1. Fonctionnement du système auditif central et surdité

Les résultats de l'étude précédente suggèrent que les enfants malentendants auraient un trouble de traitement spécifique à la surdité. Ces résultats ont été obtenus au moyen de mesures comportementales. Pour mieux examiner le traitement auditif central particulier à la surdité, des mesures par imagerie cérébrale ont été effectuées, notamment des mesures par potentiels évoqués auditifs. Ceci fait l'objet de l'article inclus dans le présent chapitre. Toutefois, des informations supplémentaires sont fournies avant et après l'article. Dans les prochaines sections, une brève description des potentiels évoqués auditifs et de leur interprétation sera donnée. Nous présentons ensuite le peu d'études ayant employé cette technique auprès d'individus qui ont une perte auditive neurosensorielle ou un TTA ainsi que des précisions relatives à la méthodologie de l'étude 2. Enfin, après l'article, des résultats complémentaires à cet article et des résultats jumelant des données des articles 1 et 2 ont été ajoutés pour alimenter la discussion sur le profil particulier du traitement de l'information auditive chez les enfants ayant une surdité.

3.1.1. Potentiels évoqués auditifs

L'électrophysiologie est une méthode directe de mesure et non invasive des activités électriques neurales reliées dans le temps à un événement spécifique (Frenck-Mestre et al., 1997). Les tracés électrophysiologiques sont présentés sous forme de séquences d'ondes positives et négatives, appelées composantes (Näätänen & Picton, 1987). Les caractéristiques des composantes – latence ou amplitude – peuvent être fortement affectées par les conditions expérimentales (ex. : le type de stimuli utilisés),

des facteurs liés à la personne évaluée (ex. : l'état de vigilance), l'utilisation de médicaments ou des lésions des voies nerveuses (Näätänen & Picton, 1987; Luck, 2005; Musiek & Lee, 1999).

Les potentiels évoqués auditifs sont classifiés selon la fenêtre temporelle dans laquelle les ondes apparaissent (latence). Les trois classifications importantes de potentiels évoqués auditifs sont les potentiels évoqués auditifs de latence courte, les potentiels évoqués auditifs de latence moyenne et les potentiels évoqués auditifs de latence longue. Les potentiels évoqués auditifs de latence longue (PÉALL) sont particulièrement intéressants pour étudier le traitement auditif au niveau cortical (Kraus & Mcgee, 1994).

Les PÉALL possèdent quatre ondes P1, N1, P2 et N2 (Figure 1). L'onde P1, première onde positive, apparaît entre 50 et 80 ms après la présentation des stimuli sonores. Elle provient possiblement des aires adjacentes au cortex auditif primaire (Liegeois-Chauvel et al., 1994). L'onde N1 est une déflexion négative survenant approximativement entre 80 et 150 ms après le début de la stimulation auditive. Elle est formée probablement à partir de l'activité du cortex auditif secondaire (Shahin et al., 2003). Pour ce qui est de l'onde P2, elle correspond à la deuxième onde positive, observée autour de 160 à 180 ms. Elle est possiblement générée par le cortex auditif secondaire (Shahin et al., 2003). Enfin, N2 est la deuxième onde négative, se formant plus tardivement, soit près de 180 à 250 ms suivant la stimulation auditive. Les générateurs de l'onde N2 seraient situés dans la région du lobe temporal (Ceponiene et al., 2002). Les ondes P1 et N2 sont souvent très amples chez les enfants, tandis que les

quatre ondes corticales, P1, N1, P2 et N2, sont généralement présentes chez les adultes (Ponton et al., 2000; Sussman et al., 2008).

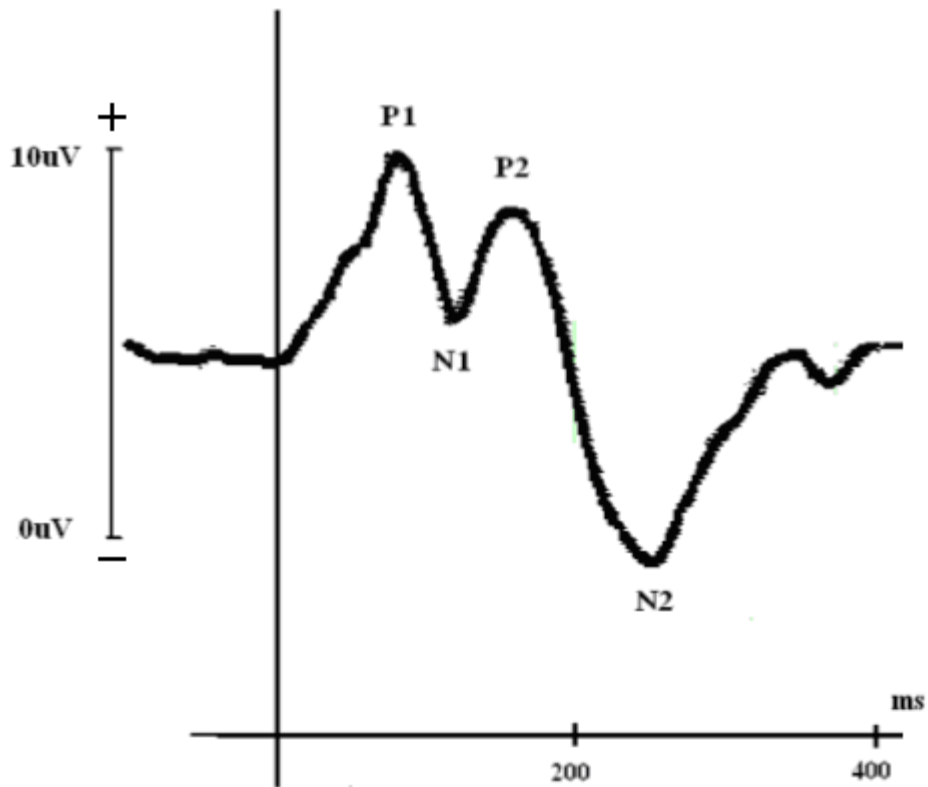


Figure 1. Représentation des quatre ondes classiques de latence longue obtenue chez un enfant de dix ans lors de stimulations auditives à l'oreille droite avec le son pur de 1000 Hz. P1 et P2 signifient les première et deuxième ondes positives respectivement. N1 et N2 représentent les première et deuxième ondes négatives.

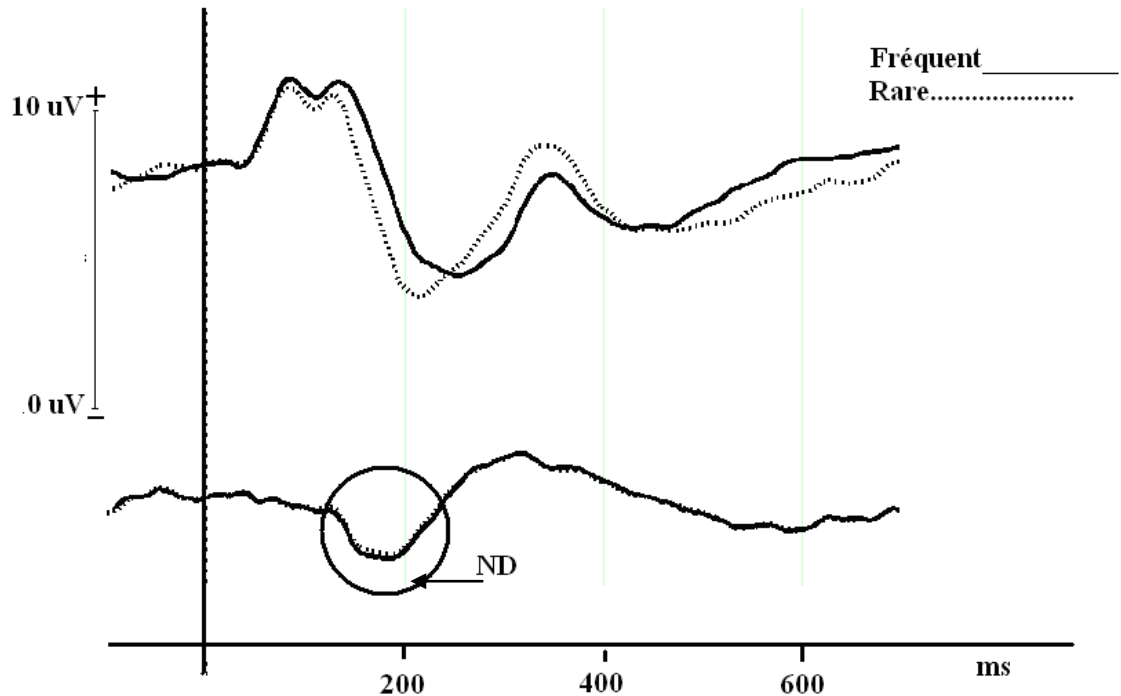


Figure 2. Exemple d'une onde de négativité de discordance (ND) obtenue chez un enfant de dix ans en soustrayant le tracé fréquent (syllabe /ba/) du tracé rare (syllabe /da/). Les stimuli ont été présentés à l'oreille droite.

Näätänen et al. (1978) ont mis en évidence une autre onde auditive importante de latence longue, l'onde de négativité de discordance (ND ou *mismatch negativity* – MMN). La ND est liée à des événements (*event-related potentials*), reflétant la discrimination automatique et passive des stimuli auditifs (Näätänen, 1990, 1992). Elle correspond à la détection automatique de changements des caractéristiques des stimuli dans l'environnement sonore (Näätänen, 1990, 1992). Elle pourrait également correspondre à la mémoire échoïque (mémoire sensorielle auditive) (Gomes et al.,

1999; Näätänen, 2000). Pour provoquer l'apparition de l'onde de ND, un paradigme de déviance (*oddball paradigm*) est utilisé.

Ce paradigme est composé d'une séquence de sons contenant un stimulus appelé rare puisque sa probabilité d'apparition dans la séquence est peu élevée (par exemple, 15% des présentations) et d'un stimulus nommé fréquent pour lequel sa probabilité d'apparition dans la séquence est nettement plus forte (par exemple, 85% des présentations). Le stimulus rare peut se différencier du stimulus fréquent par son intensité, sa fréquence, sa durée ou par une syllabe ayant des caractéristiques acoustiques distinctes (Näätänen, 1992, 2000). De façon générale, l'onde de ND serait enregistrée lorsque la personne évaluée ne porte pas attention aux stimuli présentés. L'onde de ND correspond à la différence entre l'activité cérébrale évoquée par le stimulus fréquent et celle évoquée par le stimulus rare. L'onde ND, étant une déflexion négative, apparaît aux environs de 100-250 ms, selon les stimuli utilisés (Näätänen, 1992, 2000; Näätänen et al., 2001; Näätänen & Winkler, 1999) (Figure 2). Les générateurs de l'onde de ND seraient localisés dans les régions temporales supérieures ainsi que dans les régions frontales de chaque hémisphère (Giard et al., 1990).

L'onde de P3 est une autre onde corticale, enregistrée également à l'aide du paradigme de déviance décrit plus haut. Elle se distingue de l'onde de ND sur le plan de l'attention portée au stimulus rare. Pour provoquer l'apparition de l'onde P3, la personne doit écouter activement les stimuli rares. Une onde positive ample apparaît sur le tracé du stimulus rare entre 250 et 700 ms après le début de la stimulation (Butcher, 1992; Sutton et al., 1965).

3.1.2. Potentiels évoqués auditifs de latence longue et surdité

Des études ont explorées l'effet d'une perte auditive sensorielle sur les ondes des potentiels évoqués auditifs de latence longue. Le peu d'études traitant du sujet ont des résultats parfois discordants. Par exemple, Polen (1984) a été un des premiers à effectuer les mesures de potentiels évoqués auditifs de latence longue auprès d'adultes malentendants. Avec les stimuli verbaux, consonnes /v/ (fréquent) et /tʃ/ (rare), il a étudié les ondes N1, P2, N2 et P3 chez dix huit adultes de 20 à 65 ans ayant une surdité neurosensorielle modérée à sévère et dix huit adultes entendants de 20 à 35 ans. Les résultats de cette étude ont démontré que l'amplitude de l'onde de P2 et N2 était réduite et la latence des ondes N1, N2 et P3 était allongée chez les adultes malentendants. Toutefois, cette étude possède des lacunes méthodologiques importantes. En effet, le niveau de présentation des stimuli était fixé à 70 dB HL, ce qui pouvait s'avérer insuffisant pour les participants de l'étude ayant une perte auditive modérée à sévère. De plus, certains de ces participants avaient une surdité depuis la naissance, tandis que d'autres avaient une surdité acquise dans les derniers dix ans. On devrait s'attendre à ce que l'effet d'une surdité acquise en bas âge soit différent de l'effet associé à une perte auditive due à l'exposition de bruit ou à une presbycousie. En effet, une surdité en bas âge pourrait affecter la maturation du système cortical sur les fonctions auditives centrales (Ponton et al., 1999; Sharma et al., 2002).

Les résultats de l'étude de Polen (1984) ne vont pas dans le même sens que ceux de l'étude de Wall et al. (1991). Ces derniers ont exploré l'effet d'une perte auditive sur les ondes N1, P2 et P3 chez cinq adultes ayant une surdité neurosensorielle

légère à modérée et cinq adultes entendants du même groupe d'âge (de 19 à 56 ans). Trois paires de stimuli ont été utilisés à 80 dB HL : 1) sons purs de 1000 et 2000 Hz, 2) stimuli verbaux /bɛ/ et /dɛ/ et 3) stimuli verbaux /pɛ/ et /bɛ/. Selon les résultats obtenus, il n'y avait pas de différence significative sur la valeur de la latence et de l'amplitude des ondes chez les deux groupes de participants. Une limite importante de cette étude était le nombre réduit de participants dans chaque groupe.

Oates et al. (2002) ont effectué des mesures électrophysiologiques (N1, N2, ND et P300) auprès de quarante adultes : 20 adultes ayant une perte auditive neurosensorielle de degré léger, modéré ou sévère à profond et 20 adultes ayant une sensibilité auditive dans les limites de la normale. L'objectif principal de cette étude était d'évaluer l'effet du degré d'une surdité neurosensorielle sur la valeur de la latence et de l'amplitude des potentiels évoqués auditifs. Lors de l'enregistrement de l'activité corticale, les stimuli verbaux (/ba/ et /da/) ont été présentés à travers des haut-parleurs à deux niveaux équivalents à 70 et 85 dB HL.

Selon les résultats, l'augmentation d'intensité de présentation des stimuli entraîne une réduction de la latence et une augmentation de l'amplitude des ondes de latence longue (N1, N2) et celle de potentiels liés aux événements (ND et P300) chez tous les participants. Cependant, ces changements étaient plus évidents pour les ondes mesurées chez les adultes malentendants que celles obtenues chez le groupe contrôle. Par ailleurs, au même niveau d'intensité, les résultats de deux groupes se distinguaient. En effet, l'amplitude des ondes susmentionnées (à l'exception de ND) était plus petite et leur latence se trouvait plus allongée chez les adultes malentendants

comparativement aux participants entendants. Il n'y avait pas de différence significative entre la valeur de la latence de l'onde de ND chez les deux groupes. Quant à la valeur de l'amplitude de cette onde, il y avait des variations interindividuelles importantes autant chez les adultes malentendants que chez les entendants. L'amplitude de l'onde était réduite, autant à 70 dB HL qu'à 85 dB HL pour des participants malentendants ayant une surdité plus importante, comparativement à celle d'adultes contrôles. Compte tenu de la variabilité importante des valeurs d'amplitude, les auteurs ont conclu que la latence serait un indicateur plus sensible d'une surdité que l'amplitude. De plus, ils ont avancé qu'une perte auditive neurosensorielle affecterait davantage les ondes tardives (N2 et P300) que l'onde précoce N1 (Oates et al., 2002).

En ce qui concerne les enfants malentendants, Rance et al. (2002) ont réalisé une étude chez 18 enfants ayant une neuropathie auditive et 18 enfants ayant une surdité neurosensorielle en utilisant les potentiels évoqués auditifs de latence longue et les tests de perception de la parole. Un des objectifs de cette étude était d'évaluer l'efficacité de l'appareillage auditif chez les deux groupes en mesurant les habiletés de perception de la parole. Un autre but était de vérifier la relation entre les ondes neurophysiologiques et la perception de la parole. Le niveau de présentation de stimuli variait entre 20 et 40 dB au dessus des seuils auditifs (moyenne des sons purs à 500, 1000 et 2000 Hz) selon le jugement de confort donné par l'enfant. Les stimuli verbaux (/bæd/ et /dæd/) et non verbaux (400 Hz et 440 Hz) ont été utilisés. Les stimuli ont été envoyés à l'oreille à travers un écouteur intra auriculaire.

Selon les résultats obtenus, les ondes P1, N1 et P2 étaient plus présentes chez les participants ayant une surdité neurosensorielle que chez ceux ayant une neuropathie auditive avec les stimuli utilisés. De plus, les ondes corticales étaient présentes chez les enfants ayant une surdité neurosensorielle (moyenne son pur < de 100 dB HL) et chez ceux ayant une neuropathie auditive ayant de bonnes habiletés de perception de la parole. Quand les ondes P1, N1 et P2 étaient présentes chez les enfants malentendants, la valeur de leur latence et d'amplitude était similaire à celle d'enfants normo-entendants (Rance et al., 2002).

Il faut cependant souligner que les auteurs n'ont pas présenté leur analyse statistique reliée à la latence et l'amplitude de leur étude. De plus, les enfants malentendants n'étaient pas jumelés avec leurs pairs entendants. Les ondes neurophysiologiques d'enfants malentendants (trois à neuf ans) ont été comparées à celles d'enfants entendants de quatre à six ans d'une autre étude. Il est important de comparer les réponses neurophysiologiques entre des cohortes d'enfants provenant d'un même groupe d'âge. En effet, il est connu que la latence, l'amplitude et la morphologie des ondes subissent des changements importants dus à la neuromaturation du système auditif central (Ponton et al., 2000, Sussman et al., 2008, Wunderlich et al., 2006).

Les travaux de Sharma et al. (2002a,b; 2005) ont démontré que le manque de stimulations auditives pourrait affecter le développement normal de certaines structures du système auditif central relié à l'onde P1. Cette privation sensorielle pourrait conduire à une réorganisation neurale dans le système auditif (Sharma et al., 2002a,b;

2005). Leurs travaux et ceux de Ponton et al. (1996, 1999), menés auprès d'enfants entendants et d'enfants porteurs d'un implant cochléaire, suggèrent que la plasticité des voies auditives centrales diminue en fonction de la durée de la privation auditive. Lorsque la période de privation auditive est réduite chez les enfants sourds ayant reçu précocement un implant cochléaire, les activités corticales sont approximativement similaires à celles de leurs pairs entendants (Sharma et al., 2002a,b; 2005; Ponton et al., 1999).

L'onde N2, comme P1, pourrait également être affectée par une surdité sensorielle chez les enfants. En effet, nous avons réalisé une étude électrophysiologique préliminaire auprès des dix enfants, cinq entendants et cinq malentendants (Koravand et al., soumis, voir Annexe B). Bien que les ondes corticales P1 et N2 étaient présentes chez tous les participants, les ondes N1 et P2 étaient plus souvent absentes chez les enfants malentendants. Les résultats ont également démontré que la latence de N2 était significativement plus courte et son amplitude était plus petite chez les enfants malentendants que ceux d'entendants. Les résultats suggèrent que l'amplitude de l'onde tardive N2 serait un bon indicateur pour démontrer les conséquences d'une surdité sur le traitement central (Koravand et al., soumis, Voir Annexe B).

3.1.3. Potentiels évoqués auditifs de latence longue et trouble de traitement auditif

Actuellement, aucune étude n'a examiné si les réponses électrophysiologiques mesurées chez les enfants ayant une surdité sont similaires à celles d'enfants ayant un trouble de traitement auditif. Le trouble de traitement auditif réfère à des difficultés de traitement de l'information auditive dans le système nerveux central, illustré par de

pauvres performances reliées aux habiletés suivantes : la localisation et la latéralisation sonore, la discrimination auditive, la reconnaissance de patrons auditifs, les performances auditives avec des signaux acoustiques compétitifs ou dégradés et l'aspect temporel de l'audition, incluant l'intégration temporelle, la discrimination temporelle, l'ordre temporel et le masquage temporel (ASHA, 2005).

Certaines études ont exploré le fonctionnement neurophysiologique des individus ayant un trouble de traitement auditif. Liasis et al. (2003) ont effectué des mesures de potentiels évoqués auditifs de latence longue et de ND auprès de neuf enfants chez qui on soupçonnait un trouble de traitement auditif, en utilisant les stimuli verbaux *ba/* et */da/*. Les résultats ont révélé que les ondes principales étaient plus sensibles pour identifier les déficiences auditives centrales chez ces enfants que l'onde de ND. En effet, l'amplitude d'ondes P1/N1 et P2/N2 était plus grande et celle de N1/P2 était moins ample chez le groupe d'enfants ayant un TTA que les réponses obtenues auprès des enfants du groupe contrôle. Cependant, la latence des ondes de P1, P2 et N2 était similaire chez les deux groupes, mais la latence de N1 était significativement allongée chez les enfants ayant un TTA comparativement à celle de l'onde N1 mesurée chez les enfants du groupe contrôle (Liasis et al., 2003). Les résultats de la latence de la ND n'ont révélé aucune différence significative entre deux groupes. Les auteurs n'ont pas rapporté les valeurs de l'amplitude de la ND dans l'analyse de données. Ils proposent que l'allongement de la latence de l'onde N1 soit un marqueur d'un ralentissement dans le traitement de l'information ou d'un retard de maturation des structures du système auditif central. De plus, les auteurs suggèrent que la diminution de l'amplitude des ondes pourrait être causée par un délai de maturation

dans le système auditif central (Liasis et al., 2003). On peut s'interroger sur la façon dont l'amplitude des ondes a été mesurée. L'amplitude des ondes principales a été mesurée à partir du pic d'une onde positive ou négative au pic de l'onde négative ou positive suivante. Cette méthode ne permet pas de connaître la contribution de chaque onde dans la valeur donnée.

Jirsa & Clontz (1990) ont également effectué une étude auprès de 20 enfants ayant un trouble de traitement auditif et 18 enfants contrôles. Lors de l'enregistrement électrophysiologique, ils ont soumis les enfants à une tâche d'écoute en utilisant un paradigme de déviance. Les enfants devaient presser un bouton lorsqu'ils entendaient un stimulus rare de 2 kHz. Ils devaient ignorer le stimulus fréquent de 1 kHz. Les résultats illustrés à la figure 1 de l'étude suggèrent un allongement de la latence des quatre ondes N1, P2, N2 et P3 chez les enfants ayant un trouble de traitement auditif comparativement aux valeurs des ondes des enfants contrôles (Jirsa & Clontz, 1990). De plus, l'amplitude de l'onde P3 était réduite chez les participants ayant un trouble de traitement auditif par rapport à celle de l'onde P3 des enfants contrôles.

Contrairement aux deux études mentionnées, la recherche de Sharma et al. (2006) n'a pas démontré de différence significative entre les valeurs de la latence ou de l'amplitude des ces ondes principales entre les trois groupes de participants de leur étude (enfants ayant un trouble de lecture, enfants ayant déjà eu un trouble de lecture et enfants contrôles). Les résultats ont cependant démontré que l'onde de ND était davantage absente chez les enfants ayant un trouble de lecture que chez les deux autres groupes d'enfants quand les stimuli verbaux ont été utilisés.

Les différences observées entre les résultats de trois études pourraient être expliquées par les choix méthodologiques retenus par chaque équipe de chercheurs. En effet, les habiletés auditives centrales des enfants du groupe expérimental n'étaient pas similaires d'une étude à l'autre.

À la lumière des études susmentionnées, les mesures électrophysiologiques seraient toutefois sensibles pour démontrer des différences dans le traitement auditif de l'information. Dans l'article 2, nous examinerons plus en profondeur la relation existant entre le système auditif périphérique et le système auditif central chez les enfants malentendants. Au préalable, des détails méthodologiques seront fournis.

3.2. Méthodologie

La présente étude a également été approuvée par les comités d'éthique du CHU Sainte-Justine et des établissements du Centre de recherche interdisciplinaire en réadaptation du Montréal métropolitain (CRIR) (voir Annexe E)

Les prochaines sections comprennent des renseignements sur les participants, le matériel, l'équipement et la procédure de la deuxième étude.

3.2.1. Participants

Les 40 enfants ayant participé à l'expérimentation comportementale, ont été approchés pour participer aux tests électrophysiologiques : 12 enfants malentendants, 12 enfants ayant un TTA et 16 enfants normo-entendants. Les caractéristiques de ces enfants ont été décrites dans la section 2.2.1.1. du chapitre 2.

3.2.2. Matériel

3.2.2.1. Stimuli

Afin de mettre en lumière le traitement neurophysiologique de stimuli acoustiques simples et complexes chez les enfants malentendants, deux types de stimuli ont été retenus : verbaux et non verbaux. Les stimuli verbaux étaient les syllabes /ba/ et /da/ de l'étude 1. Quant aux stimuli non verbaux, deux paires de stimuli ont été utilisées. La première paire était constituée des stimuli non verbaux de l'étude 1. Il s'agissait de la transformation acoustique des stimuli /ba/ et /da/. La deuxième paire des stimuli non verbaux était composée de deux sons purs de 1kHz et 2 kHz. Le spectre

acoustique des stimuli est présenté dans les figures 3 et 4. Les deux sons purs ont été créés par le logiciel SoundEdit 16 (version 2, 1990-1996). Les niveaux de sortie mesurés étaient à 82,1 dB SPL pour le son de 1 kHz et à 84,5 dB SPL pour le son de 2 kHz lorsque le niveau de présentation était de 70 dB HL.

Ils ont été utilisés afin de connaître la capacité des enfants à traiter de l'information moins complexe au plan acoustique. Certaines études ont démontré que le type de stimuli pourrait influencer les caractéristiques des ondes corticales (Shulte-Körne et al., 1998, 2001; Uwer et al., 2002; Sharma et al., 2006; Koravand et al., soumis, voir Annexe B).

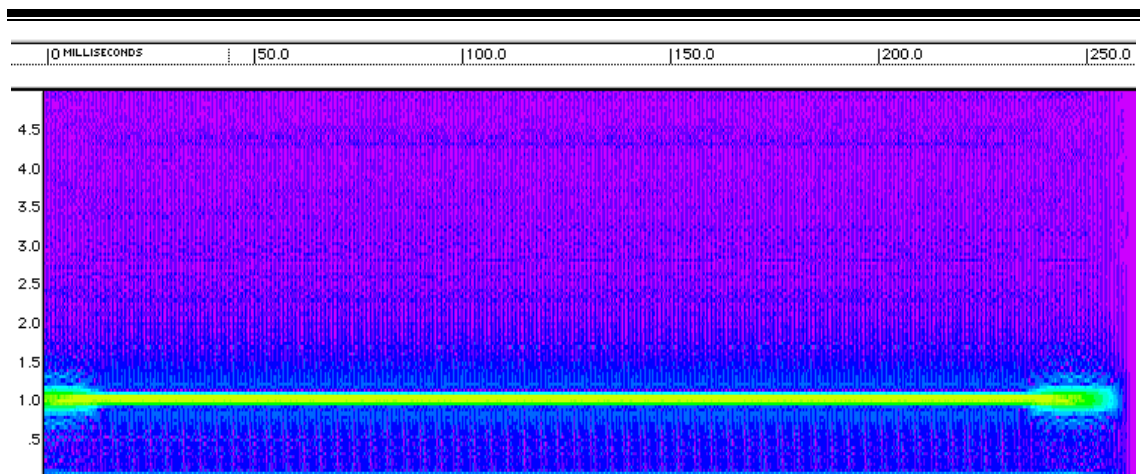


Figure 3. Spectre acoustique du son pur de 1 kHz dont la durée est de 250 millisecondes.

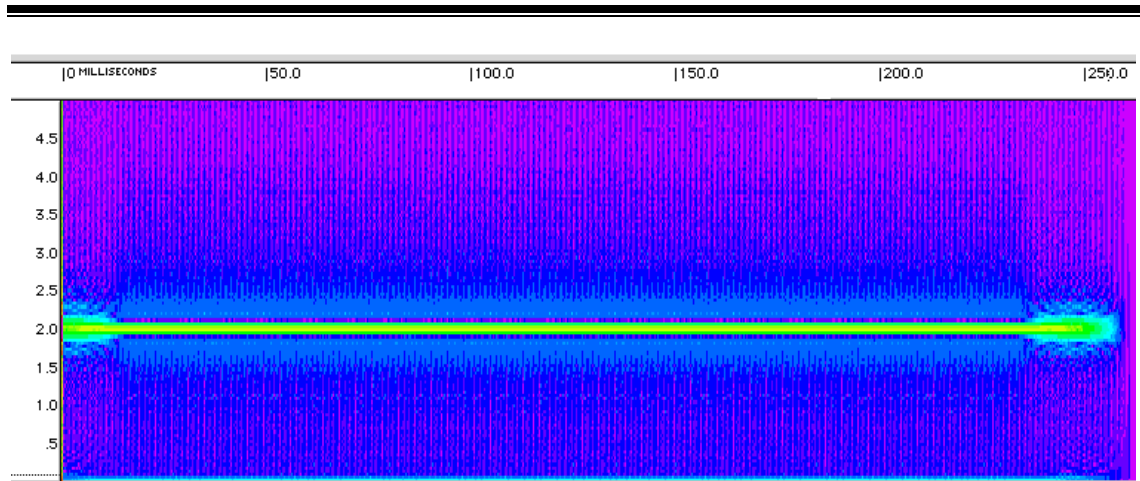


Figure 4. Spectre acoustique du son pur de 2 kHz dont la durée est de 250 millisecondes.

3.2.3. Équipement

3.2.3.1. Électrophysiologie à haute densité

Le système d'enregistrement *Geodesic Sensor Net* a été utilisé pour recueillir les données électrophysiologiques au moyen d'un bonnet de 128 électrodes d'*Electrical Geodesics Inc* dites impolarisables (Figure 5), en argent recouvert de chlorure d'argent (Ag-AgCl), distribuées sur le scalp (Tucker, 1993). Ce système est conçu pour être confortable puisque chacune des 128 électrodes est recouverte d'éponges mouillées. De plus, il est simple et rapide à installer car les électrodes sont toutes reliées entre elles par des fils avec une certaine élasticité, permettant une distribution uniforme des électrodes (Figure 5). Les éponges ont été trempées dans une solution saline comprenant de l'eau distillée avec du shampoing pour bébé pour la dissolution des huiles du cuir chevelu et de la chlorure de potassium, ce qui permettait d'obtenir une bonne impédance. L'amplificateur utilisé était un système Net Amps 200. La séquence de présentation des stimuli a été générée par le logiciel E-Prime à partir d'un ordinateur *DELL*. La pression sonore des stimuli a été contrôlée par un audiomètre (*Interacoustics, modèle AD229b*) et les stimuli auditifs ont été transmis par un écouteur intra auriculaire (*E-A-RTONE 3A*). Les données ont été enregistrées avec le programme *Net Station* utilisant une référence à Cz, sur un ordinateur *Macintosh G4*, avec un taux d'échantillonnage de 250 Hz. Un écran (*View Sonic Professional Series P225F*) était branché à un lecteur de DVD (*JVC*), permettant aux participants de regarder un film pendant l'enregistrement des ondes corticales. L'analyse des données a été réalisée à

l'aide du logiciel *Brain Vision Analyzer* en effectuant plusieurs étapes (voir section 3.3. du chapitre 3).



Figure 5. Un enfant de neuf ans portant le bonnet de *Geodesic Sensor Net* à 128 électrodes d'Ag-AgCl.

3.2.4. Déroulement

3.2.4.1. Préparation des participants

L'expérimentation a été réalisée au laboratoire d'électrophysiologie du CHU Sainte-Justine. Les enfants et leurs parents ont été familiarisés avec la procédure avant le début de l'expérimentation. Le participant est assis confortablement sur une chaise dans une cabine insonore. La procédure a commencé en effectuant trois mesures du tour

de tête : 1) celle de l'axe sagittal, du nasion à l'inion; 2) celle de l'axe transversale prise entre deux points se situant au dessus du tragus et 3) celle de la circonférence de la tête. Ces mesures ont été effectuées dans le but de trouver le positionnement de l'électrode de référence (Vertex, Cz) et celle de la mise à la terre ainsi que de choisir la grandeur du bonnet. Préalablement, le bonnet contenant les électrodes a été trempé dans une solution (à une température tiède), en s'assurant que toutes les électrodes étaient imbibées de la solution. Pour obtenir une bonne impédance, la tête de l'enfant a été nettoyée avec de l'alcool et de la crème abrasive (pâte omni) à l'aide d'un tampon. De plus, pour certains participants, nous avons dû frotter légèrement les endroits destinés aux électrodes des mastoïdes, vertex, frontales et celles des yeux avec du papier exfoliant. Le positionnement des électrodes est présenté à l'Annexe D. À la suite de l'installation du bonnet, l'impédance des électrodes a été vérifiée. Elle se situait autour de 8 kOhm pour l'ensemble des électrodes, sauf pour celles se trouvant dans la région occipitale et pour les électrodes oculaires où elle était autour de 20 kOhm. Une impédance jusqu'à 50 kOhm est acceptée pour cet équipement (Net Amps 200). Par la suite, les séquences de stimuli ont été présentées à l'oreille droite via un écouteur intra auriculaire, à l'aide du logiciel E-Prime. L'oreille droite a été choisie afin d'uniformiser la procédure avec celle de l'expérimentation comportementale à laquelle les participants ont déjà été soumis.

Pendant la période de présentation des stimuli, aucune tâche particulière n'était requise de la part d'enfant. Il devait rester assis sans trop bouger et visionnait un film silencieux (muet) de son choix avec sous-titres en français. Il avait reçu comme consigne de ne pas porter attention aux sons qu'il entendait. La séance

d'enregistrement électrophysiologique durait entre 70 à 90 minutes. À la fin de présentation de chaque paire de stimuli (environ 20 minutes), l'impédance des électrodes était vérifiée. Quand l'impédance des électrodes dépassait la limite pré-établie, les électrodes étaient réajustées en les remplaçant et en les humectant de la solution saline.

3.2.4.2. Paramètres de présentation des stimuli

Les trois paires de stimuli possédaient les mêmes paramètres de présentation, c'est-à-dire une probabilité d'apparition de 85% pour les stimuli fréquents (/ba/, non verbal /ba/ et son pur de 1 kHz) et de 15% d'apparition pour les stimuli rares (/da/, non verbal /da/ et son pur de 2 kHz). La présentation du stimulus rare a été réalisée selon une séquence pseudo aléatoire afin d'éviter que deux stimuli rares soient présentés l'un après l'autre et il fallait aussi qu'il y ait au moins trois stimuli fréquents avant un stimulus rare. Les stimuli auditifs ont été présentés à une intensité de 70 dB HL pour les enfants normo-entendants et les enfants ayant un TTA et entre 80 et 100 dB HL pour les enfants malentendants. L'intervalle entre la fin d'un stimulus et le début du suivant était d'une durée d'une seconde. La durée des stimuli était de 250 ms en ayant un temps de montée et de descente de 2.2 ms. L'ordre de présentation de chaque bloc a été contrebalancé d'un participant à l'autre.

3.3. Article 2

Auditory event related potentials in children with peripheral hearing loss

Amineh Koravand

École d'orthophonie et d'audiologie, Université de Montréal

and Centre de recherche, CHU Sainte-Justine

Benoît Jutras

École d'orthophonie et d'audiologie, Université de Montréal

and Centre de recherche, CHU Sainte-Justine

Maryse Lassonde

Department of psychology, Université de Montréal

and Centre de recherche, CHU Sainte-Justine

KEY WORDS: Peripheral hearing loss, Cortical Auditory Evoked Potentials, Mismatch Responses, Central auditory processing disorder

Corresponding author :

Adresse: Amineh Koravand, Centre de recherche du CHU Sainte-Justine, 3175 Côte Sainte-Catherine, Montréal, Québec H3T 1C5

Abstract

Objective: The aim of the present study was to investigate the neurophysiological auditory functions in children with sensory peripheral hearing loss.

Methods: Cortical auditory evoked potentials (CAEPs) and Mismatch Responses (MMRs) were recorded in 40 children aged between 9 and 12 years old: 12 with hearing loss, 12 with central auditory processing disorder (CAPD) and 16 with normal hearing. Three passive oddball paradigms were used with acoustically complex nonverbal, verbal and pure tone stimuli.

Results: For P1 amplitude and latency, there was no significant difference between the values of the group of children with hearing loss and those of the other two groups of children. A significant reduction in amplitude with the three stimuli was observed in N2 waveform in the group of children with hearing loss compared to the waveform of children with normal hearing. N2 amplitude and latency results did not reveal any significant differences between the group of children with hearing loss and the group of children with CAPD. MMR amplitude indicated a trend toward larger MMR amplitude among the group of children with hearing loss compared to the value of the group of children with CAPD.

Conclusions: Abnormal N2 characteristics could be a manifestation of a deficit in central auditory processing in children with hearing loss. This auditory cortical wave could be considered as a neurophysiologic marker of central auditory processing deficits in children.

1. Introduction

Behavioural (Jutras & Gagné, 1999; Koravand et al., 2010; Ling, 1974; Nelson & Dwyer- Thomas, 1997; Rose & Moore, 1997) and electrophysiological (Oates et al., 2002; Rance et al., 2002; Sharma et al., 2002, 2005) studies revealed that hearing loss has an effect on central auditory functions. Children with hearing loss had significantly poorer performances compared to those of children with normal hearing on behavioral tasks testing the central auditory system (Jutras & Gagné, 1999; Koravand et al., 2010; Ling, 1974). Also, results from an electrophysiological study showed that the latency of N1, N2, Mismatch Negativity (MMN) and P3 cortical waves was prolonged and their amplitude reduced in adults with sensory hearing loss compared to those of the control group (Oates et al., 2002). These results contrast with those of Rance et al. (2002) who found no significant difference between the three groups of children included in their study (neuropathy, hearing loss and control group) when cortical waveforms P1, N1 and P2 were present. However, children were not age-matched across the groups. Central auditory evoked potentials (CAEPs) are modulated by maturation (Sussman et al, 2008; Lippé et al, 2009) and cortical evoked responses obtained on individuals incorrectly matched in terms of age could have masked a potential difference between groups.

Furthermore, congenitally deaf children who received cochlear implant stimulation after age seven have abnormal P1 latency, compared to their peers without hearing loss (Sharma et al., 2002, 2005). The N2 wave could also document abnormalities in cortical auditory functions in children with sensory hearing loss (Koravand et al, submitted). Results revealed a significant reduction in N2 amplitude and latency among

children with hearing loss compared to their normal-hearing peers. However, a limited number of children (five children with hearing loss and five with normal hearing) participated in the study and there were important inter-individual differences in the data. Conducting a study with a larger sample size is needed to determine whether the latency and/or amplitude of P1 and N2 could be considered as neurophysiological markers in children with sensory hearing loss. These neurophysiological signatures could indicate a deficit in central auditory processing specific to these children.

Neurophysiological responses found in children with hearing loss seem to differ from the pattern observed in children with central auditory processing disorder (CAPD). CAPD is defined as deficiencies in the central nervous system in individuals with normal hearing sensitivity (ASHA, 2005). Children with CAPD have larger P1 and N2 amplitude (as seen in Liasis et al., 2003's Figure 1) and longer N2 latency (Jirsa, 1990) compared to their normal peers. On the other hand, electrophysiological measures of passive discrimination, such as MMR, did not reveal any significant differences between children with CAPD and their control peers (Liasis et al, 2003; Roggia & Colares, 2008). Although MMR was not studied in children with hearing loss wearing hearing aids, MMR amplitude was small and its peak latency delayed in adults with hearing loss compared to responses recorded in normal hearing adults (Ooates et al, 2002).

Based on results of the studies mentioned above, electrophysiological measures could be used as an applicable and objective tool to investigate the neurophysiological processes underlying central auditory deficits in children with hearing loss compared to children with CAPD, as well as in children with normal hearing. The present study was

designed to further explore the effects of sensory hearing loss on the neural representation of auditory stimuli.

2. Experimental Procedures

2.1. Participants

Data were collected from three groups of 9- to 12 year-old French-speaking children: Group 1) 12 with sensory hearing loss (mean age: 11 years, 2 months; SD: ± 10 mo); Group 2) 12 with CAPD (mean age: 10 years; 11 months, SD: ± 11 mo); Group 3) 16 with normal hearing (mean: 11 years; SD: ± 10 mo). Based on the average of 500, 1000 and 2000 Hz pure-tone thresholds, children in Group 1 had, on the average, hearing sensitivity within the limits of moderate hearing loss, according to Clark's (1984) classifications (Table 1). They wore their hearing aids on a regular basis for at least four years prior to the experiment (Table 1). They used an oral communication mode and were educated in the regular school system. Children in Group 2 had a diagnosis of CAPD, performed independently of the current study, before enrolling in this study. They were assessed with the French adaptation of the Staggered Spondaic Word test (Rudmin & Normandin, 1983), the French adaptation of the Synthetic Sentence Identification-Ipsilateral Competing Message (Lynch & Normandin, 1983), the Pitch Pattern Test, (Musiek, 1994), the Duration Pattern Test (Musiek, 1994), and the Random Gap detection Test (Keith, 2000). Children in Group 1 did not go through this central auditory test battery because hearing loss can affect performance on these tests (Neijenhuis et al., 2004) and there is no normative data available for this group of children. All children in Groups 2 and 3 had a detection threshold of 15 dB HL or less

for octave frequencies between 500 Hz and 8 kHz, bilaterally in a hearing screening test (re: ANSI, 1996).

All children had normal tympanograms (admittance curve with a single peak between +50 to -100 daPa using a 226 Hz probe tone) and no reported history of otologic or neurologic disorder. All children were right handed, determined according to an adapted protocol to assess laterality (De Agostini & Dellatolas, 1988). The experiment was approved by the Ethics, Administrative and Scientific Committees of the CHU Ste-Justine Research Center.

Insert Table 1

2.2. Materials

2.2.1. Stimuli

Different stimulus categories were used to provide information regarding how the brain processes simple and complex stimuli in children with sensory hearing loss. Verbal and nonverbal stimuli were used: verbal /ba/ and /da/, nonverbal acoustic stimuli (a 1 kHz and a 2 kHz pure tones) and nonverbal acoustic transformation of /ba/ and /da/. The verbal pair /ba/-/da/ consisted of two synthetic syllables collected from CD-ROM Speech Production and Perception I (Sensimetrics Corporation, 1994). The two syllables were composed of three formants, sharing the same frequencies for the first formant transition between the consonant and the vowel. The first pair of nonverbal stimuli was generated using Dr. Speech (Tiger DSR Inc, 1998) and Mitsyn (Henke, 1993) software. This pair consisted of synthesized transformations of the verbal stimuli /ba/ and /da/, were each composed of two sine waves identical to those of the central

frequencies of the second and third formant frequencies in the synthetic /ba/ and /da/ (Mody et al, 1997). However, they differed perceptually from their corresponding speech sounds. The third pair of stimuli comprised nonverbal acoustic stimuli, a 1 kHz and a 2 kHz pure tones. Verbal and nonverbal stimuli were 250 ms in duration with 2.2 ms rise and fall times.

The stimulus sequences were generated by the E-Prime Psychology software (Psychology Software Tools Inc., Pittsburgh, PA, USA) on a Dell computer. The stimulus intensity was controlled by an audiometer (Interacoustics, AD229b model). All stimuli were presented through an insert-earphone (E-A-RTONE 3A) to the right ear at 70 dB HL for children with normal hearing and children with CAPD, and between 80 and 100 dB HL for those with hearing loss (See Table 1). A passive oddball paradigm was used for stimulus presentation: standard stimuli (syllable /ba/, nonverbal /ba/ and a 1 kHz pure tone) of 85% probability of occurrence and deviant stimuli (syllable /da/, nonverbal /da/ and a 2 kHz pure tone) of 15% probability of occurrence. The interstimulus interval (ISI) was one second. Stimulus presentation order within a run was pseudo-randomized, with no two deviants occurring in succession and no run beginning with a deviant. Any deviant stimulus was always preceded by at least three standard stimuli. A sum of a thousand trials for each stimulus pair was recorded.

2.2.2. Electrophysiological recordings

The cortical responses were digitally recorded using a high-density system, the Geodesic Sensor Net with 128 electrodes (Electrical Geodesics Inc., Eugene, OR,

USA), with Net Amp 200 amplifiers. Electrophysiological signals were then acquired at a sampling rate of 250 Hz and by applying analog on-line band-pass filtered from 0.1 to 100 Hz using the Net Station program running on a G4 Macintosh computer. The ground electrode was located on the forehead (Fpz) and the reference electrode was located at the vertex. Electrode impedance was kept under 20 k Ω which is within the recommended range for a powerful amplifier system such as the one used in the current study (Net Amps 200).

2.2.3. Procedure

A consent form was read and signed by the parents of all participants. The children also gave their assent to participate in the study. During experimental procedures, the children were seated in a comfortable chair in a double-walled sound booth. Children were monitored through an infrared camera equipped with an integrated speaker and microphone, allowing communication with the experimenters located in an adjacent room. During the recording session, participants watched a silent movie or cartoon of their choice displayed on a computer monitor (View Sonic Professional Series P225F). They were encouraged to ignore the auditory input and to carefully concentrate on the movie as they were going to be asked some detailed questions about it. The total duration of testing was approximately between 90 and 120 minutes. A monetary compensation for travelling expenses was given.

2.2.4. Data analysis

EEG recordings were analysed using the BrainVision Analyser program (Brain products, Munich, Germany) on an IBM computer before obtaining the corresponding

evoked potentials. First, recorded raw data were corrected for eye movements using Gratton & Coles' algorithm (Gratton et al. 1983). The data were next digitally filtered using a band-pass filter of 1–30 Hz at 24 dB/octave. The filtered data were referenced to both left and right mastoids electrodes. Eye movements and epochs with other artefacts were rejected based on voltage criteria ($\pm 100 \mu\text{V}$ for all channels) and EEG was visually inspected to assure adequate artefact rejection. The analysis windows included 100 msec pre-stimulus baseline and 700 msec post stimulus presentation. The data were baseline corrected to -50 ms and were averaged separately for each stimulus: standard and deviant. Late auditory cortical waveforms were defined in standard and deviant waveforms as follows: P1 was the first robust positivity in the waveform in the time window of 50–100 ms; N1 was the first negativity occurring after the P1 response in the time window of 80–120 ms. An additional criterion for the identification of the N1 wave was the presence of a positive peak following the negativity, defined as P2 with the time window of 100–180; N2, the second robust negativity after the P2 response, was observed at around 200–280 ms. Latency and amplitude values were determined for each wave (P1, N1, P2 and N2) when present for the three stimuli. Amplitude values were measured from the baseline to peak of each wave, and latency values were measured relative to the onset of the stimulus presentation.

The Mismatch Responses (MMRs) were computed according to the following procedure: responses evoked by a standard stimulus (syllable /ba/, nonverbal /ba/ and 1 kHz pure tone) were subtracted from responses evoked by a deviant stimulus (syllable /da/, nonverbal /da/ and 2 kHz pure tone) for each participant. With the tonal pair (1 kHz and 2 kHz pure tones), a negative peak (originated from N1–N2 region) was

measured from 130 to 220 ms. With the verbal and the nonverbal /ba/-/da/ pairs, the prevalent response was observed in the time window of 150 to 300 ms which was related to the N1-N2 waves. A peak amplitude detection manipulation was performed for each participant to measure the latency of the most negative peaks for the MMRs.

Voltage distribution of the cortical positive and negative peaks and of the MMRs was generated using Brain Vision Analyzer. Two-dimensional mapping of the scalp distribution of the voltage was created by choosing the maximal amplitude of the peaks on each group's grand averaged potentials in the frontal region.

3. Results

Figure 1 displays electrophysiological responses to standard stimuli for all stimuli in the three groups of children. For CAEPs, midline electrodes (anterior and posterior to Cz and Cz,) and for the MMRs, midline electrodes (Fz, FCz and Cz) were selected for the statistical analyses. Midline electrodes have generally the biggest amplitude and the greatest signal-to-noise ratio for auditory cortical responses and MMRs (Ponton et al., 2000; Gilley et al., 2005; Ooates et al., 2002).

Repeated measures analyses of variance (ANOVA) followed by post hoc t-tests were used for statistical analyses of latency and amplitude measurements. To control for Type I error during post hoc analyses, Bonferroni corrections were applied and *p*-values less than 0.016 were accepted as being significant.

Only the cortical auditory P1 and N2 waves were present with the standard and deviant stimuli in all children with the three stimulus pairs. Although N1 and P2 were present

in 75% of children with normal hearing, they were absent in almost 50% of children with hearing loss and in those with CAPD. Statistical analyses were conducted on P1 and N2 amplitude and latency values obtained with the standard stimuli and on MMRs amplitude and latency. The standard sound waveforms were more well-defined and had a clearer morphology compared to those obtained from the deviant waveforms.

Insert Figure 1

3.1. Cortical auditory P1 and N2 waves

For the latency and amplitude of P1 and N2, a three-way ANOVA was performed for Group – children with normal hearing, children with CAPD and children with a hearing loss, Type of stimuli – verbal /ba/, nonverbal /ba/ and 1 kHz pure tone, and Electrode position – FCz, Cz, CPz.

Insert Table 2 and 3

3.1.1. Latency – For P1 latency, a significant effect was only observed for the factor Type (Table 2). Results revealed a significant latency prolongation for the verbal /ba/ comparatively to the nonverbal /ba/ [$t(39) = 3, p < .016$] and compared to the 1 kHz pure tone stimuli [$t(39) = 2.7, p < .016$]. There was no significant difference between nonverbal /ba/ and 1 kHz pure tone stimuli [$t(39) = .26, p = .8$].

For N2 latency, results indicated a significant effect of the main Type factor (Table 2). Additional analyses demonstrated a significant longer latency for the verbal /ba/ as

compared to the nonverbal /ba/ [$t(39) = 4.5, p < .016$] and the 1 kHz pure tone stimuli [$t(39) = 5, p < .016$]. There was no significant difference between the nonverbal /ba/ and 1 kHz pure tone stimuli [$t(39) = .5, p = .6$].

3.1.2. Amplitude – Regarding P1 amplitude, a significant effect was only found for the factor Electrode position (Table 2). Results revealed a significant greater amplitude for FCz compared to Cz [$t(39) = 7.7, p < .016$] and to CPz [$t(39) = 8.8, p < .016$]. Amplitude was also larger for Cz comparatively to CPz [$t(39) = 7.4, p < .016$].

For N2 amplitude, significant effects were found on the three main factors: Group, Type of stimuli and Electrode position, and for the two-way interaction Type x Electrode (Table 2). Regarding the main Group effect, a significantly reduced amplitude was observed in children with hearing loss compared to the amplitude value of children with normal hearing [$t(26) = 3.8, p < .016$]. No significant differences were found between children with normal hearing and children with CAPD [$t(26) = .8, p = .4$] nor between children with hearing loss and children with CAPD [$t(22) = 2.1, p = 0.016$].

Analysis of simple effects for the significant interaction Type x Electrode indicated a significant amplitude reduction for the verbal comparatively to the other two stimuli; to the 1 kHz pure tone (on FCz [$t(78) = 5.3, p < .016$]; Cz [$t(78) = 4.5, p < .016$], CPz [$t(78) = 3.5, p < .016$]) and to the nonverbal /ba/ (on FCz [$t(78) = 3.2, p < .016$]; Cz [$t(78) = 3.02, p < .016$]; CPz [$t(78) = 2.66, p < .016$]). There was no significant difference between nonverbal /ba/ and 1 kHz pure tone stimuli for FCz [$t(78) = 2, p = .05$]; Cz [$t(78) = 1.3, p = .2$] or CPz [$t(78) = .87, p = .4$].

3.1.3. Cortical distribution – P1 and N2 brain activity was located in the frontal region of the cortex and was not spatially different in the three groups for the three stimuli, except for the verbal stimuli where N2 activity was somehow lateralized on the right side for the group of children with hearing loss (Figure 4).

3.2. Mismatch responses (MMRs)

A three-way ANOVA with repeated measures was performed (Group, Stimulus type and Electrode position) for MMR latency and amplitude.

Insert Figures 2 and 3

3.2.1. Latency – For MMR latency, results indicated a significant effect only for the factor Type (Table 3). A significant latency prolongation was observed for the verbal /ba/-/da/ pair as compared to the nonverbal /ba/-/da/ pair [$t(39) = 10.15, p < .016$] and also comparatively to the 1 kHz and 2 kHz pure-tone pair [$t(39) = 14.1, p < .016$]. A significant longer latency was obtained for the nonverbal /ba/-/da/ pair than to the 1 kHz and 2 kHz pure-tone pair [$t(39) = 6, p < .016$].

3.2.2. Amplitude – With regard to negative MMR amplitude, results revealed a significant effect for Type and Electrode position as well as for the two-way interaction Electrode x Type (Table 3). The main Group factor failed to reach significance but a trend toward a greater MMR amplitude was observed in children with hearing loss compared to the response obtained in children with CAPD [$F(2, 37) = 2.7, p = .08$].

Analysis of simple effects for the significant interaction Type x Electrode indicated a significant greater amplitude for the 1 kHz-2 kHz pure-tone pair as compared to the nonverbal /ba-/da/ pair (on Fz [$t(78) = 4.7, p < .016$]; FCz [$t(78) = 4.7, p < .016$]; Cz [$t(78) = 3.7, p < .016$]) and also comparatively to verbal ba-/da/ pair (on Fz [$t(78) = 6.5, p < .016$]; FCz [$t(78) = 6.3, p < .016$]; Cz [$t(78) = 5.5, p < .016$]). There was no significant difference between the verbal and nonverbal /ba-/da/ pairs for the same electrode positions (Fz [$t(78) = 2.3, p = .024$]; FCz [$t(78) = 2.4, p = 0.02$]; Cz [$t(78) = 2.3, p = .025$]).

3.2.3. Cortical distribution – With the three pairs of stimuli, brain activity related to MMRs was negative mainly in the frontal region of the cortex in the three groups, and the distribution was larger in the HL group. (Figure 5).

Insert Figures 4 and 5

4. Discussion

The aim of the current study was to investigate how sensory hearing loss would modulate cortical activity related to auditory stimulations in children with hearing loss. Results of the present study did not reveal any significant differences in P1 latency, amplitude and cortical distribution between children with hearing loss and children with normal hearing. These results suggest that the sensory hearing loss does not have a significant impact on the timing (latency) and the strength (amplitude) of the cortical brain processes underlying the detection of the acoustic stimuli at this early stage of processing (100 ms). Moreover, the results of the P1 scalp distributions in children with hearing loss suggest that the underlying activation of P1 is similar in these children as

compared to children with normal hearing. Furthermore, the current P1 results suggest that the early auditory processing stage is similar in children with peripheral hearing loss and in children with CAPD. However, these results may not apply to all children with hearing loss at least for two reasons. A first factor is related to the degree of hearing loss. Results in adults (Oates et al., 2002) and in children (Rance et al., 2002) have shown that there is a directly proportional relationship between the degree of hearing loss and the latency of some of the ERPs waves. However, the majority of participants of these studies and of the present research had at least moderate hearing loss. Consequently, it is still unclear how mild sensory hearing loss could affect the characteristics of cortical auditory responses in children. In the future, it would be important to investigate how different degrees of hearing loss could modulate cortical auditory responses in children. These findings would help in developing normative data. The second factor is maturation. The age of children has to be considered when testing children with CAEPs. In the present study, children with hearing loss were on average 11 years old. The P1 wave has already gone through different maturation stages (Ponton et al., 2000; Sussman et al., 2008). Further investigations should be planned to evaluate the clinical utility of P1 as a biomarker for assessing the maturation of the central auditory system in younger children with a hearing loss wearing hearing aids as was shown by Sharma et al. (2002, 2005) in children with a cochlear implant. More specifically, this investigation would emphasize how the age of identification and the early auditory intervention could affect the maturation process.

In contrast, children with hearing loss have reduced N2 amplitude compared to their normal peers whereas children with CAPD showed an intermediate pattern, differing

neither from the children with hearing loss nor from the children with normal hearing. The N2 wave does not only reflect the encoding of the stimuli, it also indexes further stimuli processing (Ceponiene et al., 2008). The reduction of the N2 amplitude could thus be interpreted as an indication of less efficient central auditory processing. Although the reduction of N2 amplitude was found in children with hearing loss and to a lesser extent, in those with CAPD, the underlying neural mechanisms of this reduction could be different in the two groups

The N2 latency had similar values in children with hearing loss compared to those of their normal peers. This result indicates that although the cortical resources may be less efficient or less available as interpreted from the cortical mapping and the small N2 amplitude, they can process the auditory information as rapidly as children with normal hearing.

Abnormal N2 characteristics have been reported in children with language impairment. In the latter, the N2 is smaller in amplitude and longer in latency than in their healthy peers (Tonquist-Uhlen, 1996). In another study (Gilley et al., 2006), the reduction of amplitude and/or the prolongation of latency of N2 was an indication of abnormal auditory processing in children with language-based learning problems. The reduction of N2 amplitude (on standard and deviant waveforms in a passive oddball condition) was also observed by Data et al. (2010) in children with speech language impairment.

Other findings of the present study revealed that N1 and P2 waveforms were less well defined or were absent in children with hearing loss and in children with CAPD compared to the CAEPs of children with normal hearing. Contrary to P1 and N2 waves

which can be observed even in the early years of childhood, N1 and P2 do not emerge consistently until the age of 8 to 11 years in children with normal hearing (Ponton et al., 1996, 2000; Sussman et al., 2008). The absence of these two auditory waves or their affected morphology could be an indication of a delay in maturation of the central auditory nervous system although the origin of this delay might not be the same in children with hearing loss and those with CAPD. Auditory deprivation in children with hearing loss could affect the normal development of the central auditory system. This is consistent with Ponton et al., 1996's study reporting that N1 and P2 are either delayed or absent in children with a cochlear implant. A hypothesis of a delay in maturation has been also reported in children with CAPD (Liasis et al., 2003) and in children with learning problems and related auditory processing problems (Gilley et al, 2006).

Overall the CAEPs findings of the present study suggest that while primary input to the auditory cortex (P1) may be well functioning, generators associated with N1, P2 and N2 development may show some immaturities and/or less functional processing in children with hearing loss. CAEPs findings may suggest a general decrease in synchronous activity, which in turn may indicate a different development of the central auditory pathways. Even though the maturational time course (Ponton et al, 2000; Sharma et al, 1997; Wunderlich et al, 2006) and the generators (Ceponiene et al., 2002; Baumann et al., 1990; Liegeois-Chauvel et al., 1994; Perrault & Picton, 1984; Shanin et al., 2003) of the four auditory waves are different, one might wonder why the manifestation of hearing loss is more dominant on the N2 response than on P1. These two auditory cortical responses might reflect different aspects of auditory function. N2 peak might represent the more advanced analysis or a higher-order processing of

stimuli where as P1 reflects the detection or sensory encoding of auditory stimulus (Ceponiene et al., 2008). The difference between P1 and N2 could be also related to physiological issues. In fact, age-related changes in CAEP characteristics are affected essentially by axon myelination, maturation of synaptic mechanisms and by the number of pyramidal cell synapses (Eggermont 1988; Ponton et al., 2000). Increases in myelination as well as improvements in synapse efficacy may occur faster in structures related to the P1 responses than for those of N2 responses in children with hearing loss. Efficiency improvement of neural transmission related to N2 could take place later in the life. Conducting further investigations in children between 12 and 15 years old with a hearing loss wearing hearing aids should examine if the results with the N2 wave are reproducible in this age group. If older children with hearing loss demonstrate similar N2 results as their normal peers, these could suggest that N2 development require a longer time course to mature in children with hearing loss. However if the findings reveal different N2 results in the two groups of children, this could be interpreted as a sign of permanent modulation in neural auditory network caused by hearing loss. Such studies will help to evaluate the clinical utility of the N2 as a biomarker of the central auditory system.

For MMRs, children with hearing loss demonstrated patterns similar to those seen in children with normal hearing, but different from those of children with CAPD. These results suggest that hearing loss would not affect the processes involved in discriminating verbal or nonverbal sounds at a neurophysiological level. However, these passive discrimination processes seem to be affected in children with CAPD,

which is consistent with the results obtained by Sharma et al, (2006). They showed that speech-evoked MMN was significantly reduced in amplitude in children who failed auditory processing testing.

Results of the present study demonstrated that N2 and MMRs were found to differ according to stimulus type. Central auditory system requires extra time and efforts for processing complex stimuli (verbal /ba/-/da) than simple ones (1 kHz and 2 kHz pure tone). N2 and MMRs had an earlier latency and greater amplitude with simple stimuli compared to more complex stimuli. The effect of stimulus type on ERP results has also been reported in other studies (Koravand et al., submitted; Sharma et al, 2006; Sebastian & Yasin, 2008; Uwer et al., 2002).

5. Conclusions

The present study indicates that cortical auditory evoked potentials (CAEPs) can be more sensitive neurophysiological markers of the deficit in central auditory system than are MMRs in children with hearing loss. More specifically, results showed that children with hearing loss showed signs of deficient late-stage auditory perceptual processing such as an abnormal N2 amplitude, whereas the earlier sensory stages, as indexed by the P1, were not different from children with normal hearing function. It is therefore possible that the N2 wave has the potential to be used as a clinical tool for detecting abnormalities in central auditory processing.

Acknowledgments

The first author is grateful to the *Fonds de la recherche en santé du Québec* (FRSQ) and the Research Centre of CHU Sainte-Justine for their financial support through scholarships. This research was funded in part by the Canadian Institutes of Health Research, *Réseau provincial de recherche en adaptation-réadaptation* (REPAR), the Research Centre of CHU Sainte-Justine, The Hearing Foundation of Canada and the Canadian Foundation for Innovation. The authors are grateful to the children and their parents who invested considerable time and effort to participate in this research project. We are very grateful to Phetsamone Vannasing, Marie-Claude Godin, Wafaa Rhoualem and Marie-Michèle Béliveau for their assistance in the present research study.

References

ANSI- American National Standard Institute: American National Standard Specifications for Audiometers. 1996; New York : USA Standard.

American Speech-Language-Hearing Association, (2005), Central auditory processing disorders. Retrieved March 3, 2010 from <http://www.asha.org/docs/html/tr2005-00043.html>.

Baumann SB, Rogers RL, Papanicolaou AC, Saydjari CL (1990), Intersession replicability of dipole parameters from free components of the auditory evoked magnetic field. *Brain Topography* 3: 311-319.

Ceponiene R, Torki M, Alku P, Koyama, A, Townsend J (2008), Event-related potentials reflect spectral differences in speech and non-speech stimuli in children and adults. *Clin Neurophysiol* 119:1560–1577.

Clark JG (1981), Uses and abuses of hearing loss classification. *ASHA* 23: 493-500.

Datta H, Shafer VL, Morr ML, Kurtzberg D, Schwartz RG (2010), Electrophysiological indices of discrimination of long-duration, phonetically similar vowels in children with typical and atypical language development. *J Speech Lang Hear Res* 53:757-77.

De Agostini M, Dellatolas G (1988), Une épreuve simple pour évaluer la préférence manuelle chez l'enfant à partir de 3 ans. *Enfance* 41: 139-147.

Dr Speech: Version, 4, 20. Tiger DRS inc. 1998; United States of America.

Eggermont JJ (1998), On the maturation of sensory evoked potentials. *Electroenceph clin Neurophysiol* 70:293-305.

Gilley PhM, Sharma A, Dorman M, Martin K (2006), Abnormalities in central auditory maturation in children with language-based learning problems. *Clin Neurophysiol* 117: 1949-1956.

Gratton G, Coles MG, Donchin E (1983), A new method for off-line removal of ocular artifact. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol* 55: 468-484.

Henke W (1993), Mitsyn Software program. Boston: Massachusetts Institute of Technology.

Jirsa RE, Clontz KB (1990), Long latency auditory event-related potentials from children with auditory processing disorders. *Ear Hear* 11: 222-232.

Jutras B, Gagné JP (1999), Auditory sequential organization among children with and without a hearing loss. *J Speech, Lang Hear Res* 42: 553-567.

Keith RW (2000), Random Gap Detection Test, Auditec of St Louis Ltd.

Koravand A, Jutras B, Roumy N (2010), Peripheral hearing loss and auditory temporal-ordering ability in children. *Int J Pediatr Otorhinolaryngo* 74: 50-55.

Koravand, A., Jutras, B. & Lassonde, M. (submitted). Cortical auditory evoked potentials in children with a hearing loss: A pilot study. *Int J Pediatr*

Liasis A, Bamio DE, Campbell P, Sirimanna T, Boyd S, Towell A (2003), Auditory event-related potentials in the assessment of auditory processing disorders: A pilot study. *Neuropediatrics* 34: 23-29.

Ling AH (1975), Memory for verbal and nonverbal auditory sequences in hearing-impaired and normal-hearing children. *J Am Audiol Soc* 1 : 37-45.

Liegeois-Chauvel C, Musolino A, Badier JM, Marquis P, Chauvel P (1994), Evoked potentials recorded from the auditory cortex in man: Evaluation and topography of the middle latency components. *Electroenceph Clin Neurophysiol* 92: 204-214.

Lippé S, Martinez-Montes E, Arcand C, Lassonde M (2009), Electrophysiological study of auditory development. *Neuroscience* 164: 1108-1118.

Lynch A, Normandin N(1983), SSI: Élaboration d'une version française et application auprès d'une population d'enfants avec troubles d'apprentissage. Unpublished Master's thesis, University of Montreal, Canada.

Musiek FE (1994), Frequency (pitch) and duration pattern tests, *J Am Acad Audiol* 5: 265—268.

Mody M, Studdert-Kennedy M, Brady S (1997), Speech perception deficits in poor readers: Auditory processing or phonological coding? *J Exp Child Psychol* 64: 199-231.

Nelson PB, Dwyer Thomas S (1997), Gap detection as a function of stimulus loudness for listeners with and without hearing loss. *J Speech, Lang Hear Res* 40 :1387-1394.

Neijenhuis K, Tschur H, Snik A (2004), The effect of mild hearing impairment on auditory processing tests. *J Am Acad of Audiol* 15: 6-16.

Oates PA, Kurtzberg D, Stapells DR (2002), Effects of sensorineural hearing loss on cortical event-related potential and behavioral measures of speech-sound processing. *Ear Hear* 23: 399-415.

Ponton C, Eggermont JJ, Kwong B, Don M (2000), Maturation of human central auditory system activity: evidence from multi-channel evoked potentials. *Clin Neurophysiol* 111: 220-236.

Ponton C, Don M, Eggermont JJ, Waring MD, Masuda A (1996), Maturation of human cortical auditory function: differences between normal-hearing children and children with cochlear implants. *Ear Hear* 17: 430-437.

Perrault N, Picton T (1984), Event-related potentials recorded from the scalp and nasopharynx : I. N1 and P2. *Electroenceph Clin Neurophysiol* 59, 261-278.

Rance G, Cone-Wesson B, Wunderlich J, Dowell R (2002), Speech perception and cortical event related potentials in children with AN. *Ear Hear* 23: 239-253.

Roggia SM, Colares NT (2008), Mismatch negativity in patients with (central) auditory processing disorders. *Braz J Otorhinolaryngol* 74 : 705-711.

Rose MM, Moore BCJ (1997), Perceptual grouping of tone sequences by normally hearing and hearing impaired listeners. *J Acoust Soc Am* 102: 1768-1778.

Rudmin F, Normandin N (1983), Experimental dichotic tests in French modeled on SSW design. *Hum Commun Can* 3 :348-360.

Sebastian C, Yasin I (2008), Speech versus tone processing in compensated dyslexia: Discrimination and lateralization with a dichotic Mismatch Negativity (MMN) paradigm. *Int. J. Psychophysiol* 70: 115-126.

Sensimetrics Series in Human Communication (1994), Speech Production and Perception I. (CD-ROM), Edmonds, WA: Sensimetrics.

Sharma A, Dorman MF, Spahr A (2002), A sensitive period for the development of the central auditory system in children with cochlear implants: implications for age of implantation. *Ear Hear* 23: 532-539.

Sharma A, Dorman MF, Kral A (2005), The influence of a sensitive period on central auditory development in children with unilateral and bilateral cochlear implants. *Hear Res* 203: 134-143.

Sharma A, Kraus N, McGee TJ, Nicol TG (1997), Developmental changes in P1 and N1 central auditory responses elicited by consonant-vowel syllables. *ElectroencephClin Neurophysiol* 104 : 540-545.

Sussman E, Steinschneider M, Gumenyuk V, Grushko J, Lawson K (2008), The maturation of human evoked brain potentials to sounds presented at different stimulus rates. *Hear Res* 236: 61-79.

Tonnquist-Uhlen I (1996), "Topography of auditory evoked long-latency potentials in children with severe language impairment: the P2 and N2 components." *Ear Hear* 17: 314-326.

Uwer R, Albrecht R, von Suchodoletz W (2002), Automatic processing of tones and speech stimuli in children with specific language impairment. *Dev Med Child Neurol* 44: 527-532.

Wunderlich JL, Cone-Wesson BK, Shepherd R (2006), Maturation of the cortical auditory evoked potential in infants and young children. *Hear Res* 212 :185-202.

Table 1.

Nine- to twelve-year-old participant with hearing loss (P): age (years; months); age of hearing aids fitting (H/A); sex and hearing loss measured in the right ear at 250 to 8000 Hz; PTA (average threshold of 500, 1 kHz, 2 kHz) and level of stimuli presentation (LP) in dB HL.

| P | Age | H/A | Sex | Hearing threshold (dB HL) | | | | | | PTA | LP |
|----|-------|------|-----|---------------------------|-----|------|------|------|------|-----|-----|
| | | | | 250 | 500 | 1000 | 2000 | 4000 | 8000 | | |
| 1 | 12;04 | 8;00 | F | 50 | 55 | 55 | 30 | 40 | 60 | 47 | 85 |
| 2 | 9;08 | 4;03 | M | 60 | 65 | 70 | 75 | 65 | 40 | 70 | 95 |
| 3 | 12;00 | 7;00 | M | 40 | 50 | 55 | 65 | 45 | 90 | 57 | 85 |
| 4 | 12;02 | 2;00 | M | 25 | 45 | 65 | 80 | 70 | 75 | 63 | 90 |
| 5 | 9;11 | 6;00 | F | 30 | 30 | 40 | 40 | 50 | 50 | 37 | 80 |
| 6 | 12;02 | 3;10 | F | 25 | 25 | 45 | 65 | 55 | 55 | 45 | 80 |
| 7 | 10;06 | 2;04 | F | 40 | 40 | 45 | 50 | 55 | 50 | 45 | 80 |
| 8 | 11;04 | 3;06 | F | 30 | 50 | 65 | 65 | 70 | 70 | 60 | 90 |
| 9 | 11;07 | 3;00 | M | 65 | 55 | 55 | 55 | 60 | 70 | 55 | 90 |
| 10 | 11;05 | 4;00 | F | 35 | 45 | 70 | 75 | 80 | 85 | 63 | 90 |
| 11 | 10;04 | 2;03 | M | 60 | 60 | 70 | 70 | 60 | 75 | 67 | 100 |
| 12 | 11;04 | 7;03 | F | 25 | 40 | 45 | 60 | 55 | 40 | 48 | 95 |

Table 2. Results of the three-way ANOVA: Group x Type of stimuli x Electrode position, with repeated measures for Type and Electrode for P1 and N2 latency and amplitude in Evoked Potential recording (from Standard stimuli)

| | P1 | | | | N2 | | | |
|----------------------|---------------------------------|---------------------------------|----------|---------------|---------------------------------|---------------------------------|----------|---------------|
| | <u>df</u> (between Group) | <u>df</u> (With in Group) | <u>F</u> | <u>P <</u> | <u>df</u> (between Group) | <u>df</u> (With in Group) | <u>F</u> | <u>P <</u> |
| Latency | | | | | | | | |
| Type | 1.43 | 52.9 | 7 | .001 | 2 | 74 | 18.01 | .001 |
| Electrode | 1.4 | 52.9 | 3.1 | NS | 1.5 | 56.6 | .6 | NS |
| Group | 2 | 37 | .48 | NS | 2 | 37 | .67 | NS |
| Type*Electrode | 1.5 | 55.3 | .95 | NS | 2.7 | 99.1 | .3 | NS |
| Type*Group | 4 | 74 | 1.9 | NS | 4 | 74 | .8 | NS |
| Electrode*Group | 4 | 74 | 1.1 | NS | 4 | 74 | 1.1 | NS |
| Type*Electrode*Group | 8 | 148 | .9 | NS | 8 | 148 | .43 | NS |
| Amplitude | | | | | | | | |
| Type | 2 | 74 | .54 | NS | 2 | 74 | 42 | .001 |
| Electrode | 1.3 | 46.04 | 68.8 | .001 | 1.48 | 54.8 | 139 | .001 |
| Group | 2 | 37 | .5 | NS | 2 | 37 | 6.85 | .01 |
| Type*Electrode | 2.3 | 85 | .8 | NS | 2.6 | 96.7 | 17.7 | .001 |
| Type*Group | 4 | 74 | .42 | NS | 4 | 74 | 1.6 | NS |
| Electrode*Group | 4 | 74 | .8 | NS | 4 | 74 | .35 | NS |
| Type*Electrode*Group | 8 | 148 | 1.54 | NS | 8 | 148 | 1.4 | NS |

NS = Not significant ($p > .05$)

Table 3. Results of the three-way ANOVA: Group X Type of stimuli X Electrode position, with repeated measures for Type and Electrode for MMR latency and amplitude

| | df | df | F | <i>P</i> < | df | df | F | <i>P</i> < |
|----------------------|-----------------|-----------------|------|------------------|-----------------|-----------------|------|------------|
| | (between Group) | (With in Group) | | | (between Group) | (With in Group) | | |
| Latency | | | | Amplitude | | | | |
| Type | 2 | 74 | 128 | .001 | 2 | 74 | 25.4 | .001 |
| Electrode | 1.4 | 51.55 | .3 | NS | 1.7 | 62.4 | 15.9 | .001 |
| Group | 2 | 37 | .38 | NS | 2 | 37 | 2.7 | NS |
| Type*Electrode | 2.6 | 96.4 | 1.96 | NS | 3.3 | 122.5 | 8.6 | .001 |
| Type*Group | 4 | 74 | 2.34 | NS | 4 | 74 | 1.8 | NS |
| Electrode*Group | 4 | 74 | .5 | NS | 4 | 74 | .35 | NS |
| Type*Electrode*Group | 8 | 148 | 1 | NS | 8 | 148 | 1.4 | NS |

NS = Not significant ($p > .05$)

Figure Captions

Figure 1. Waveforms recorded from three groups of children: (16 with normal hearing – NH, 12 with hearing loss – HL and 12 with central auditory processing disorder – CAPD) to the standard stimuli, 1kHz Pure tone, nonverbal /ba/ and verbal /ba/ at FCz electrode. Stimuli were presented at 70 dB HL for NH children (solid line) and for children with CAPD (dotted line) and between 85 and 100 dB HL for children with HL (dashed line) in the passive listening paradigm. The top, middle and bottom rows of waveforms display the four principal waves, P1, N1, P2 and N2, observed with respectively the 1kHz Pure tone, the nonverbal /ba/ and the verbal /ba/ stimuli. The amplitude scale is 10 uV and the latency range is -100 to 700 ms.

Figure 2. The latency value and standard deviation (bars) of mismatch responses (MMRs), recorded from children with normal hearing (NH), with hearing loss (HL) and with central auditory processing disorder (CAPD), is presented with the three pair stimuli; Tone (1kHz and 2 kHz Pure tone), NV (nonverbal /ba-/da/) and Verbal (/ba-/da/).

Figure 3. The amplitude value and standard deviation (bars) of mismatch responses (MMRs), recorded from children with normal hearing (NH), with hearing loss (HL) and with central auditory processing disorder (CAPD), is presented with the three pair stimuli; Tone (1kHz and 2 kHz Pure tone), NV (nonverbal /ba-/da/) and Verbal (/ba-/da/).

Figure 4. Cortical topographies of last cortical auditory evoked potentials (CAEPs) wave (N2) to the standard stimuli (1kHz Pure tone, nonverbal /ba/ and verbal /ba/) at FCz, recorded from children with normal hearing – NH (left column), from those with hearing loss – HL (middle column) and from children with central auditory processing disorder – CAPD (right column).

Figure 5. Cortical topographies of mismatch responses (MMRs) to the three pairs of stimuli: Tone (1kHz and 2 kHz Pure tone), NV (nonverbal /ba/-/da/) and Verbal (/ba/-/da/) at FCz, recorded from children with normal hearing – NH (left column), from those with hearing loss – HL (middle column) and from children with central auditory processing disorder – CAPD (right column).

Figure 1

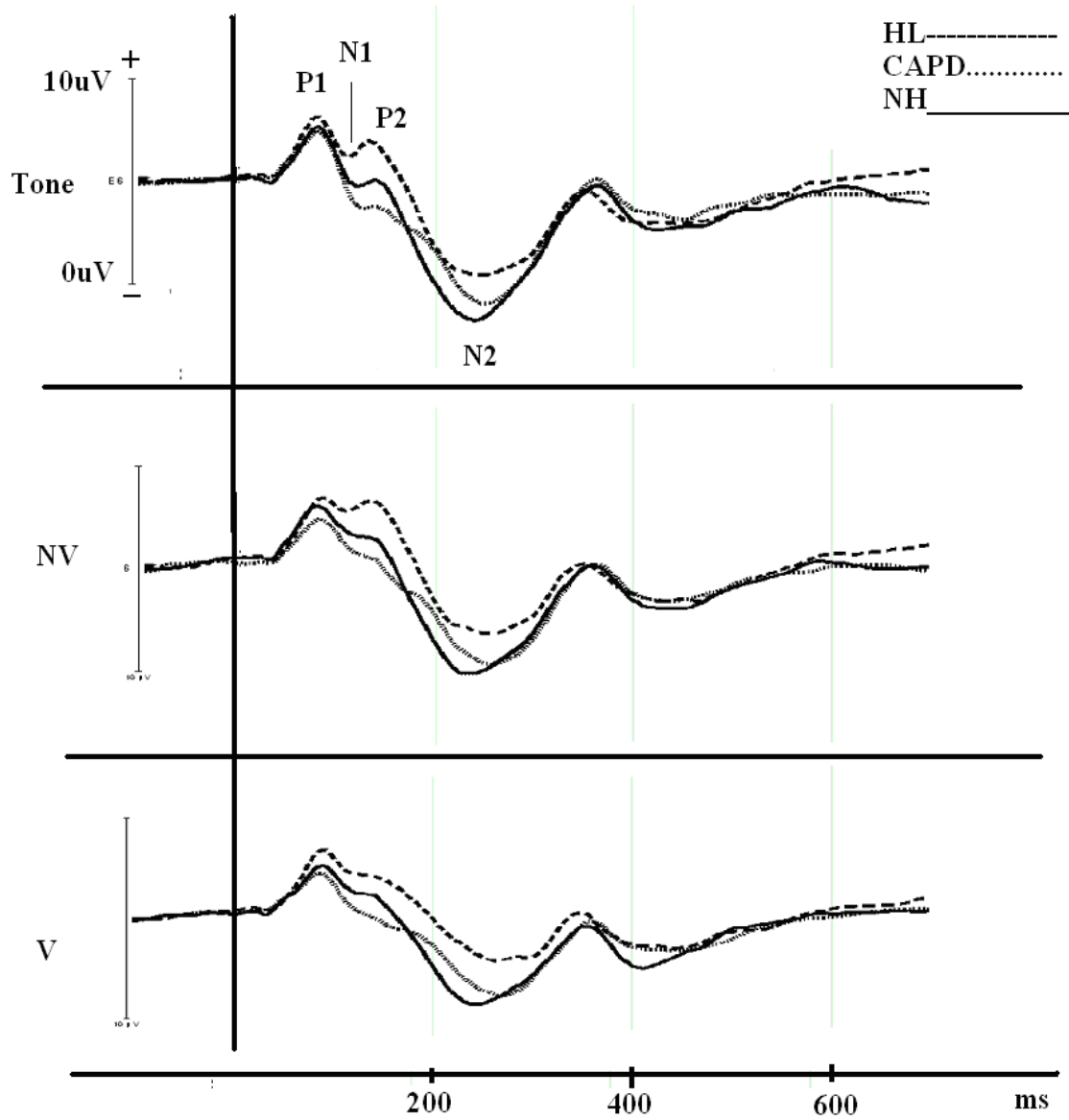


Figure 2

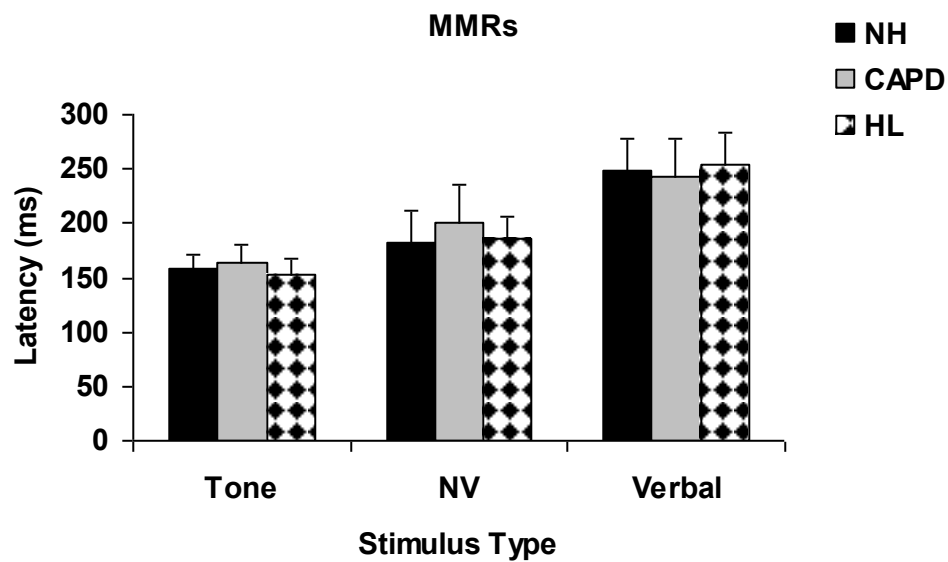


Figure 3

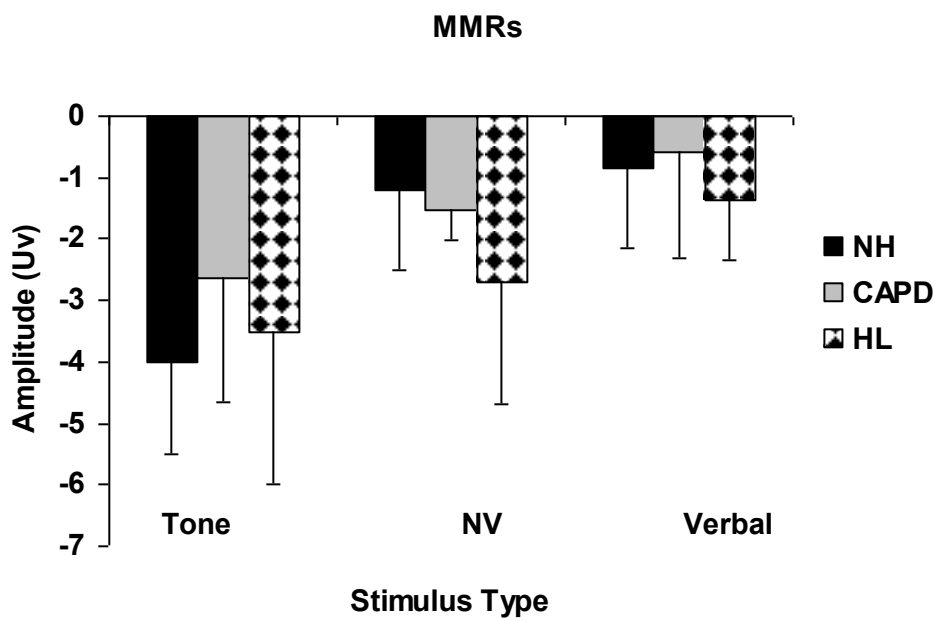


Figure 4

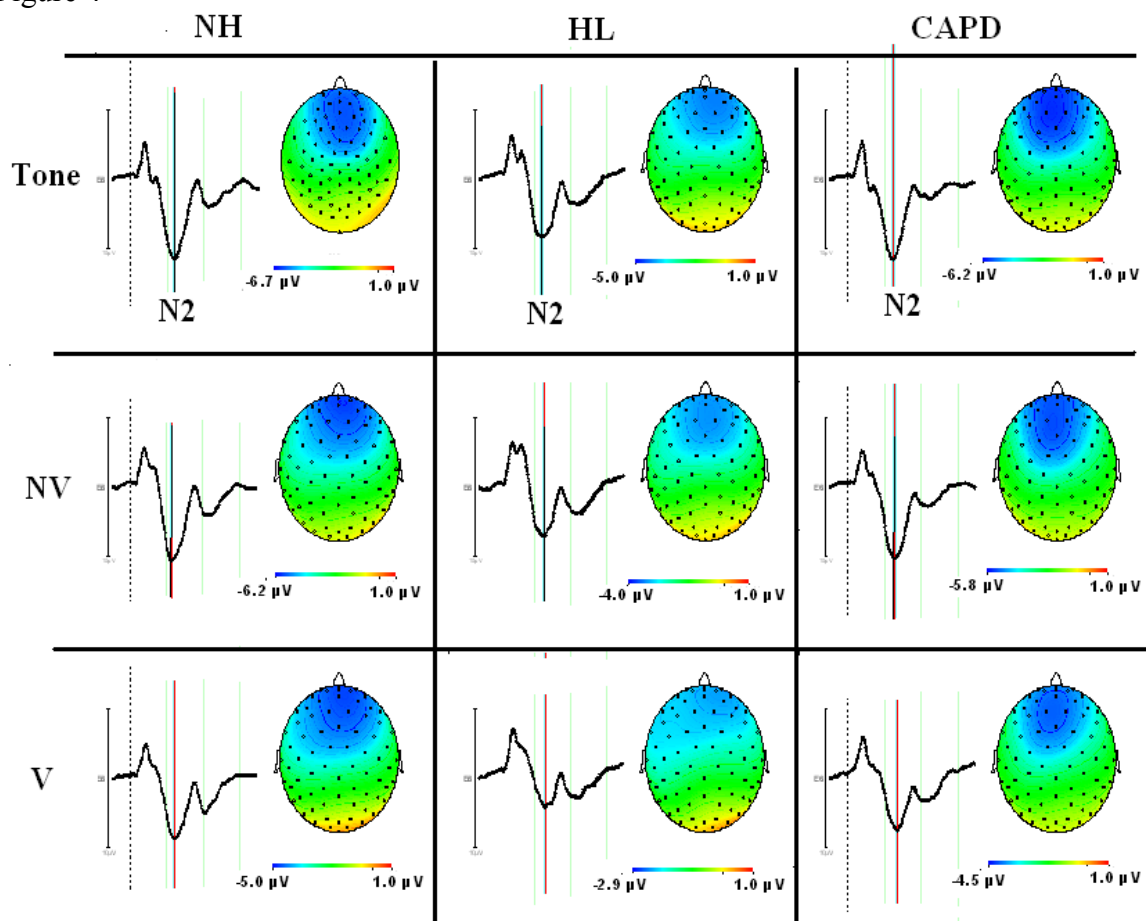
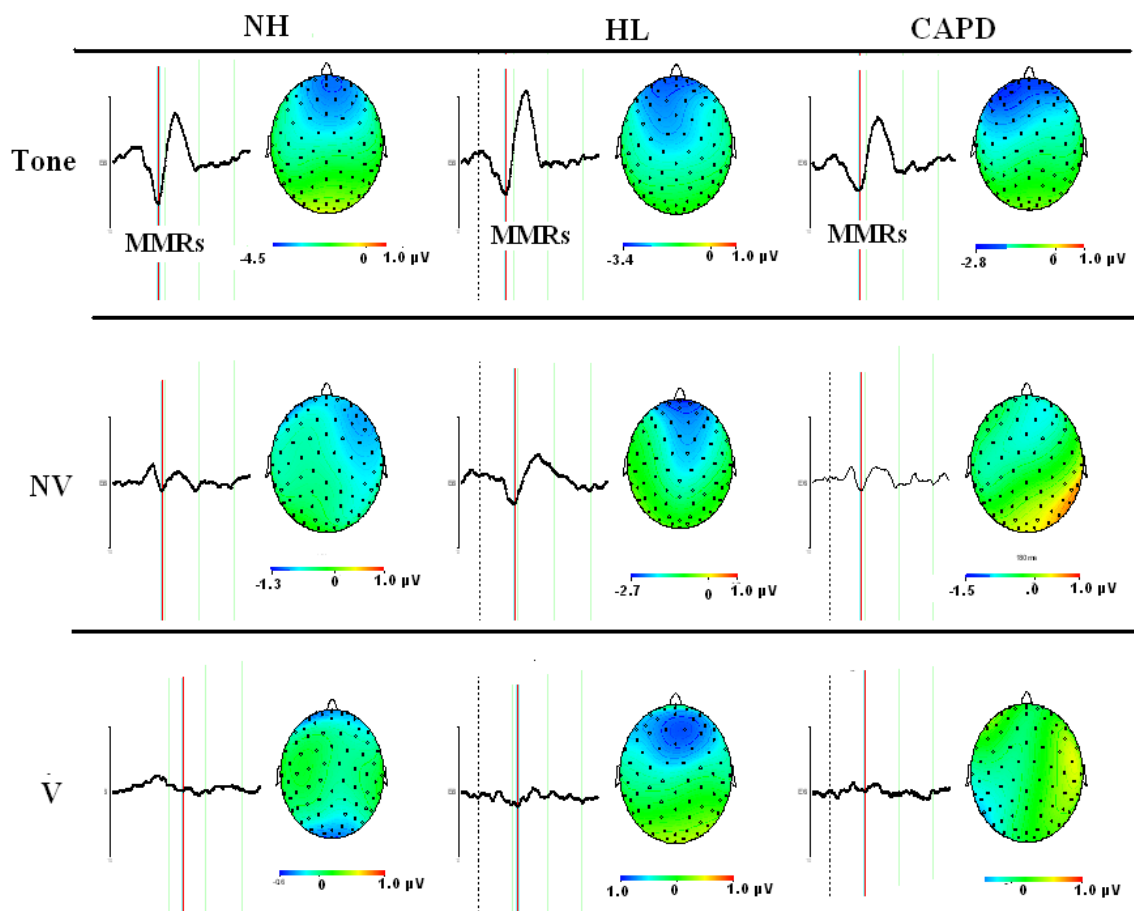


Figure 5



3.4. Résultats complémentaires

3.4.1. Résultats complémentaires à l'étude 2

3.4.1.1. Présence des ondes de latence longue

Comme mentionné dans l'étude 2, le nombre de participants dont les tracés électrophysiologiques avaient les quatre ondes de latence longue était limité. Le tableau I regroupe le pourcentage de participants dans chaque groupe chez qui les ondes P1, N1, P2 et N2 ont été identifiées en fonction des stimuli fréquents et rares. Les ondes P1 et N2 ont été identifiées chez tous les participants des trois groupes pour les trois stimuli. Quant aux ondes N1 et P2, elles étaient davantage présentes avec les stimuli fréquents comparativement aux stimuli rares. De plus, indépendamment du type de stimuli, ces deux ondes ont été identifiées chez la majorité des enfants normo-entendants (77%) par rapport aux enfants malentendants (47%) et aux enfants ayant un TTA (58%).

Tableau I. Pourcentage de participants dans les trois groupes (normo-entendants – NE, malentendants – ME, et trouble de traitement auditif – TTA), chez qui les ondes auditives de latence longue P1, N1, P2 et N2 ont été identifiées en fonction des stimuli : verbaux /ba/ et /da/ (V /ba/ et V /da/), non verbaux /ba/ et /da/ (NV /ba/ et NV /da/) et sons purs (1 kHz et 2 kHz) pour les tracés reliés au type de stimuli (fréquent et rare).

| Groupe | Type | Stimuli | P1 | N1 | P2 | N2 |
|--------|----------|---------|------|-----|-----|------|
| NE | Fréquent | V /ba/ | 100% | 75% | 75% | 100% |
| | | NV /ba/ | 100% | 75% | 75% | 100% |
| | | 1kHz | 100% | 81% | 81% | 100% |
| | Rare | V /ba/ | 100% | 62% | 62% | 100% |
| | | NV /ba/ | 100% | 43% | 43% | 100% |
| | | 2 kHz | 100% | 50% | 50% | 100% |
| ME | Fréquent | V /ba/ | 100% | 42% | 42% | 100% |
| | | NV /ba/ | 100% | 42% | 42% | 100% |
| | | 1kHz | 100% | 58% | 58% | 100% |
| | Rare | V /ba/ | 100% | 33% | 33% | 100% |
| | | NV /ba/ | 100% | 33% | 33% | 100% |
| | | 2kHz | 100% | 50% | 50% | 100% |
| TTA | Fréquent | V /ba/ | 100% | 58% | 58% | 100% |
| | | NV /ba/ | 100% | 58% | 58% | 100% |
| | | 1kHz | 100% | 58% | 58% | 100% |
| | Rare | V /ba/ | 100% | 33% | 33% | 100% |
| | | NV /ba/ | 100% | 33% | 33% | 100% |
| | | 2kHz | 100% | 33% | 33% | 100% |

3.4.1.2. Corrélation entre l'âge des enfants et la latence et l'amplitude de P1 et N2

Compte tenu que les caractéristiques de réponses neurophysiologiques changent au cours du développement (Ponton et al., 2000; Sussman et al., 2008; Wunderlich et al., 2006), nous avons étudié l'effet du facteur de l'âge sur les résultats de la présente recherche. Pour ce faire, nous avons effectué une corrélation entre l'âge des enfants et les caractéristiques de l'onde P1 et N2 (amplitude et latence). En se référant aux analyses statistiques effectuées dans l'étude 2, quand le facteur du type n'était pas significatif, nous avons fait une moyenne à partir des valeurs des trois stimuli. Dans le cas contraire, la corrélation a été réalisée pour chaque stimulus séparément. Pour éviter l'erreur du type I, une correction de *Bonferroni* ($p < .016$) a été appliquée. Les données ont été sélectionnées à l'électrode FCz quand le facteur d'électrode était significatif. En effet, les ondes ont été clairement observées sur cette électrode. De plus, la valeur de la latence et de l'amplitude sur l'électrode FCz était plus importante par rapport à celle des autres électrodes. Lorsque le facteur d'électrode n'était pas significatif, nous avons effectué la moyenne des valeurs obtenues aux trois électrodes centrales (FCz, Cz et CPz).

En premier lieu, nous avons effectué l'analyse sans tenir compte du facteur Groupe. Puis, nous avons refait les analyses chez le groupe d'enfants malentendants uniquement.

3.4.1.2.1. Trois groupes

Pour la latence de l'onde P1, l'analyse de corrélation a été effectuée pour les trois stimuli. Avec le stimulus de 1 kHz, la corrélation n'était pas significative due à la correction de *Bonferroni* ($p < .016$), mais une tendance a été observée [$n=40$ $r = .33$, $p = .03$]. La corrélation n'était pas non plus significative avec le stimulus non verbal /ba/ [$n=40$ $r = .21$, $p = .18$] et le verbal /ba/ [$n=40$ $r = .004$, $p = .98$]. Quant à la latence de N2, aucune corrélation significative n'a pas été trouvée avec les trois stimuli : 1 kHz [$n=40$ $r = .16$, $p = .32$], non verbal /ba/ [$n=40$ $r = .24$, $p = .13$] et verbal /ba/ [$n=40$ $r = .03$, $p = .9$].

En ce qui concerne l'amplitude de P1, aucune corrélation significative n'a pas été observée entre l'âge des enfants et l'amplitude de P1 [$n=40$ $r = .2$, $p = .2$]. En ce qui concerne l'amplitude de N2, la corrélation était significative avec le stimulus de 1 kHz [$n=40$ $r = .52$, $p < .016$] et le non verbal /ba/ [$n=40$ $r = .48$, $p < .016$]. L'analyse de corrélation avec le stimulus verbal /ba/ n'a pas atteint le seuil de signification lorsque la correction de *Bonferroni* ($p < .016$) a été appliquée [$n=40$ $r = .36$, $p = .02$].

3.4.1.2.2. Enfants malentendants

Nous avons également étudié la corrélation entre l'âge des enfants malentendants et la latence et l'amplitude de l'onde P1 et N2. Pour la latence de P1, les résultats ne démontraient aucune corrélation significative avec les trois stimuli : 1 kHz [$n=12$ $r = -.26$, $p = .4$], non verbal /ba/ [$n=12$ $r = -.12$, $p = .7$] et verbal /ba/ [$n=12$ $r = .03$, $p = .9$]. En ce qui concerne la latence de l'onde de N2, la corrélation n'était pas

significative avec tous les stimuli : 1 kHz [$n=12$ $r = .12$, $p = .71$], non verbal /ba/ [$n=12$ $r = .28$, $p = .38$] et verbal /ba/ [$n=12$ $r = .05$, $p = .9$].

Quand à l'amplitude de P1, la corrélation était significative [$n=12$ $r = .7$, $p < .01$]. Pour l'amplitude de N2, la corrélation n'était pas significative avec les trois stimuli en appliquant la correction de *Bonferroni* ($p < .016$) : 1 kHz [$n=12$ $r = .67$, $p = .018$], non verbal /ba/ [$n=12$ $r = .63$, $p = .028$] et verbal /ba/ [$n=12$ $r = .66$, $p = .02$]. Cependant, une tendance a été observée avec les trois stimuli.

3.4.1.3. Latéralisation du traitement de l'information auditive

Dans cette section, nous présentons des analyses statistiques complémentaires aux analyses effectuées dans l'article 2 de la présente thèse afin d'examiner la latéralisation du traitement de l'information auditive chez les trois groupes de participants.

Nous avons refait l'analyse de l'étude 2 en incluant les deux électrodes latérales C3 et C4, en plus des trois centrales FCz, Cz et CPz, pour vérifier 1) s'il y a une latéralisation dans le traitement de l'information auditive et 2) si les résultats sont similaires entre les trois groupes de participants. Les résultats de l'étude de maturation de Ponton et al., (2000) ont démontré que l'amplitude de certaines ondes change de façon importante sur les électrodes latérales (C3 et C4) comparativement aux électrodes centrales (FCz, Cz et CPz) chez les enfants neuf à onze ans. De plus, Alonso-Bu'a et al. (2006) ont trouvé que l'amplitude de l'onde tardive de négativité de discordance était plus grande dans l'hémisphère droit chez les enfants ayant un

problème de lecture que chez les enfants du groupe contrôle. Lorsque les auteurs ont étudié les données dans une autre région corticale, l'amplitude de l'onde de ND était réduite chez les enfants ayant des problèmes de lecture.

Pour la latence et l'amplitude des ondes P1 et N2, nous avons effectué des analyses de variance à mesures répétées pour le groupe (normo-entendant, malentendant et TTA), le type de stimuli (verbal /ba/, non verbal /ba/ et son pur de 1 kHz) et le site d'électrodes (FCz, Cz, CPz, C3 et C4).

Pour la latence de l'onde P1, une différence significative a été trouvée pour le facteur Type seulement (voir Tableau II). La décomposition des résultats, en appliquant une correction Bonferroni ($p < .016$), a démontré que la latence de l'onde P1 était significativement plus longue avec le stimulus verbal par rapport au stimulus non verbal [$t(39) = 3.2, p < .016$] et au son de 1 kHz [$t(39) = 2.9, p < .016$].

En ce qui concerne la latence de N2, une différence significative a été trouvée pour les facteurs Type et Électrode ainsi que pour l'interaction triple (Groupe x Type x Électrode) (voir Tableau II). Des analyses complémentaires ont été effectuées pour explorer la nature de l'interaction triple (voir Tableau III). Pour chaque site d'électrode, une analyse de variance avec les facteurs Type et Groupe a été réalisée. Le facteur Type était significatif pour tous les sites d'électrodes. Pour toutes les sites d'électrodes, aucune différence significative n'a été observée pour le facteur Groupe ni pour l'interaction double Groupe x Type (voir Tableau III).

Tableau II. Résultats de l'analyse de variance entre le groupe d'enfants (normo-entendants, malentendants, ayant un trouble de traitement auditif), le type du stimulus (verbal /ba/, non verbal /ba/ et le son pur de 1 kHz) et le site d'électrodes (FCz, Cz, CPz, C3 et C4), avec des mesures répétées pour Type et Électrode. L'analyse a été effectuée pour la valeur de la latence et de l'amplitude des ondes P1 et N2.

| | P1 | | | | N2 | | | |
|-----------------------|-------------------------|-------------------------|-------|------------|-------------------------|-------------------------|-------|------------|
| | dl (inter groupe) | dl (intra groupe) | F | <i>p</i> < | dl (inter groupe) | dl (intra groupe) | F | <i>p</i> < |
| Latence | | | | | | | | |
| Type | 1.32 | 49 | 8.15 | .001 | 2 | 74 | 22.22 | .001 |
| Électrode | 2.32 | 85.73 | .73 | NS | 3.05 | 112.9 | 2.9 | .01 |
| Groupe | 2 | 37 | .41 | NS | 2 | 37 | .63 | NS |
| Type*Électrode | 3.97 | 146.8 | .91 | NS | 5.1 | 188.4 | 1.14 | NS |
| Type*Groupe | 4 | 74 | 1.76 | NS | 4 | 74 | .42 | NS |
| Électrode*Groupe | 8 | 148 | .37 | NS | 8 | 148 | 1.18 | NS |
| Type*Électrode*Groupe | 16 | 296 | 1.1 | NS | 16 | 296 | 1.7 | .05 |
| Amplitude | | | | | | | | |
| Type | 2 | 74 | .68 | NS | 2 | 74 | 40.57 | .001 |
| Électrode | 2.6 | 95.1 | 44.24 | .001 | 2.8 | 102.44 | 78.72 | .001 |
| Groupe | 2 | 37 | .4 | NS | 2 | 37 | 5.60 | .01 |
| Type*Électrode | 5.03 | 186.1 | 1.33 | NS | 5.9 | 213.9 | 10.11 | .001 |
| Type*Groupe | 4 | 74 | .51 | NS | 4 | 74 | 1.52 | NS |
| Électrode*Groupe | 8 | 148 | .85 | NS | 8 | 148 | 1.2 | NS |
| Type*Électrode*Groupe | 16 | 296 | 1.01 | NS | 16 | 296 | 1.5 | NS |

dl = Degré de liberté, NS = Non significatif ($p > .05$)

Tableau III. Résultats de la décomposition de l'interaction triple (Groupe x Type x Electrode). L'analyse a été effectuée pour la valeur de la latence de l'onde N2.

| Latence de l'onde N2 | | dl | dl | F | p< |
|----------------------|-----|-------------------|-------------------|-------|------|
| | | (inter groupe) | (intra groupe) | | |
| Type | FCz | 2 | 74 | 16.8 | .001 |
| | Cz | 1.7 | 61 | 17.7 | .001 |
| | CPz | 2 | 74 | 8.6 | .001 |
| | C3 | 2 | 74 | 10.3 | .001 |
| | C4 | 2 | 74 | 21.23 | .001 |
| Groupe | FCz | 2 | 37 | .45 | NS |
| | Cz | 2 | 37 | .4 | NS |
| | CPz | 2 | 37 | 1.2 | NS |
| | C3 | 2 | 37 | 1.1 | NS |
| | C4 | 2 | 37 | .2 | NS |
| Type x Groupe | FCz | 4 | 74 | .5 | NS |
| | Cz | 4 | 74 | 1 | NS |
| | CPz | 4 | 74 | .66 | NS |
| | C3 | 4 | 74 | 2.1 | NS |
| | C4 | 4 | 74 | .4 | NS |

dl = Degré de liberté, NS = Non significatif ($p > .05$)

Selon le *test-t* avec la correction *Bonferroni* ($p < .016$) sur tous les sites d'électrodes, la latence de N2 était significativement plus longue avec le stimulus verbal /ba/ par rapport au stimulus non verbal /ba/ et aussi par rapport au son pur de 1 kHz (voir Tableau IV).

Tableau IV. Résultats des tests t selon le type de stimulus (verbal /ba/, non verbal /ba/ et le son pur de 1 kHz) sur le site d'électrodes FCz, Cz, CPz, C3 et C4, pour la latence de l'onde de N2.

| Latence de l'onde N2 | | | |
|---|----|------|------|
| | dl | t | p< |
| Verbal /ba/ versus non verbal /ba/ en | | | |
| FCz | 39 | 4.96 | .016 |
| Cz | 39 | 4.2 | .016 |
| CPz | 39 | 2.8 | .016 |
| C3 | 39 | 4.4 | .016 |
| C4 | 39 | 5.3 | .016 |
| Verbal /ba/ versus son pur 1 kHz sur | | | |
| FCz | 39 | 4.4 | .016 |
| Cz | 39 | 4.7 | .016 |
| CPz | 39 | 3.7 | .016 |
| C3 | 39 | 3 | .016 |
| C4 | 39 | 5.6 | .016 |
| Non verbal /ba/ versus son pur 1 kHz sur | | | |
| FCz | 39 | .2 | NS |
| Cz | 39 | .5 | NS |
| CPz | 39 | .83 | NS |
| C3 | 39 | 1.1 | NS |
| C4 | 39 | .14 | NS |

dl = Degré de liberté, NS = Non significatif ($p > .016$ à cause de correction Bonferroni)

En ce qui concerne l'amplitude de l'onde P1, l'analyse des données a démontré que le facteur Électrode était significatif (voir Tableau II). Les résultats de *test-t* (avec la correction de *Bonferroni*, $p < .005$) ont montré que l'amplitude de l'onde P1 était significativement plus grande sur FCz par rapport aux autres sites (voir Tableau V). L'amplitude de l'onde P1 sur Cz était significativement plus grande en comparaison

avec CPz, C3 et C4. Quant à l'électrode CPz, la valeur de l'amplitude de l'onde P1 était plus grande sur cette électrode par rapport aux deux électrodes latérales.

Tableau V. Résultats des tests t pour les sites d'électrodes FCz, Cz, CPz, C3 et C4. L'analyse a été effectuée pour la valeur de l'amplitude de l'onde P1.

| Amplitude de l'onde P1 | | | |
|------------------------|----|----------|------------|
| | dl | <i>t</i> | <i>p</i> < |
| FCz versus Cz | 39 | 7.7 | .005 |
| FCz versus CPz | 39 | 8.8 | .005 |
| FCz versus C3 | 39 | 7.13 | .005 |
| FCz versus C4 | 39 | 9.1 | .005 |
| Cz versus CPz | 39 | 7.36 | .005 |
| Cz versus C3 | 39 | 3.6 | .005 |
| Cz versus C4 | 39 | 4.1 | .005 |
| CPz versus C3 | 39 | 3.4 | .005 |
| CPz versus C4 | 39 | 3.9 | .005 |
| C3 versus C4 | 39 | .26 | NS |

dl = Degré de liberté, NS = Non significatif ($p > .005$ à cause de correction Bonferroni)

Quant à l'amplitude N2, une différence significative a été obtenue pour les trois facteurs principaux (Type de stimuli, Groupe et le site d'électrodes) ainsi que pour l'interaction Type x Électrode (voir Tableau II). En ce qui concerne le facteur de Groupe, l'analyse de résultats a démontré que l'amplitude de l'onde N2 était significativement plus petite chez le groupe d'enfants malentendants en comparaison à celle du groupe d'enfants normo-entendants [$t(26) = 3.4, p < .016$].

Les résultats de la décomposition de l'interaction Type x Électrode ont montré que le facteur Électrode était significatif avec les trois stimuli : son pur 1 kHz [$F(4, 195) = 10.3, p < 0.001$], non verbal /ba/ [$F(4, 195) = 8.3, p < 0.001$] et verbal /ba/ [$F(4, 195) = 7.01, p < 0.001$].

Les résultats de *test-t* (avec la correction de *Bonferroni*, $p < .005$) ont généralement montré que l'amplitude de l'onde N2 était significativement plus grande en FCz comparativement aux autres électrodes pour les trois stimuli. De plus, l'amplitude de l'onde N2 était significativement plus grande en Cz qu'en CPz avec le son pur seulement [$t(78) = 3.1, p < .005$] (voir Tableau VI).

Tableau VI. Résultats des tests t pour les sites d'électrodes FCz, Cz, CPz, C3 et C4, selon le type de stimulus (son pur, non verbal /ba/ et verbal /ba/). L'analyse a été effectuée pour la valeur de l'amplitude de l'onde N2.

| Amplitude de l'onde N2 | | | |
|------------------------|----|-----|------|
| | dl | t | p< |
| Son Pur | | | |
| FCz versus Cz | 78 | 3.5 | .005 |
| FCz versus CPz | 78 | 6.4 | .005 |
| FCz versus C3 | 78 | 4.3 | .005 |
| FCz versus C4 | 78 | 4.2 | .005 |
| Cz versus CPz | 78 | 3.1 | .005 |
| Cz versus C3 | 78 | 1.1 | NS |
| Cz versus C4 | 78 | 1.2 | NS |
| CPz versus C3 | 78 | 1.7 | NS |
| CPz versus C4 | 78 | 1.6 | NS |
| C3 versus C4 | 78 | .1 | NS |
| Non verabl /ba/ | | | |
| FCz versus Cz | 78 | 2.6 | NS |
| FCz versus CPz | 78 | 5.3 | .005 |
| FCz versus C3 | 78 | 3.5 | .005 |
| FCz versus C4 | 78 | 4.3 | .005 |
| Cz versus CPz | 78 | 2.7 | NS |
| Cz versus C3 | 78 | 1 | NS |
| Cz versus C4 | 78 | 1.7 | NS |
| CPz versus C3 | 78 | 1.6 | NS |
| CPz versus C4 | 78 | 1 | NS |
| C3 versus C4 | 78 | .6 | NS |
| Verbal /ba/ | | | |
| FCz versus Cz | 78 | 2.4 | NS |
| FCz versus CPz | 78 | 4.9 | .005 |
| FCz versus C3 | 78 | 3.1 | .005 |
| FCz versus C4 | 78 | 3.6 | .005 |
| Cz versus CPz | 78 | 2.6 | .005 |
| Cz versus C3 | 78 | .9 | NS |
| Cz versus C4 | 78 | 1.3 | NS |
| CPz versus C3 | 78 | 1.9 | NS |
| CPz versus C4 | 78 | 1.2 | NS |
| C3 versus C4 | 78 | .6 | NS |

dl = Degré de liberté, NS = Non significatif ($p > .005$ à cause de correction Bonferroni)

Pour vérifier si le traitement auditif était latéralisé plus spécifiquement chez les enfants malentendants, nous avons comparé, de façon exploratoire, les résultats d'enfants malentendants aux deux autres groupes séparément, considérant ces groupes comme étant des groupes contrôles. Pour le faire, d'une part, douze enfants malentendants ont été jumelés selon l'âge et le sexe à douze enfants normo-entendants et d'autre part, douze enfants malentendants ont été pairés à dix enfants ayant un TTA. Nous présentons donc les résultats des données faites en tenant compte uniquement des groupes d'enfants malentendants et les normo-entendants (Tableau VII) et des groupes d'enfants malentendants et ceux ayant un TTA (Tableau VIII).

Nous rapportons dans cette section uniquement les résultats significatifs ou les tendances qui n'ont pas été rapportés dans l'analyse précédente. L'interaction triple (Groupe x Type du stimulus x Électrode) était significative entre les enfants malentendants et les enfants normo-entendants pour la latence de N2. Des analyses complémentaires ont été effectuées pour explorer la nature de l'interaction triple. Pour chaque site d'électrodes, une analyse de variance avec les facteurs Type et Groupe a été réalisée. Le facteur Type était significatif pour tous les sites d'électrodes (voir Tableau IX). Pour le facteur Groupe, pour tous les sites d'électrodes, aucune différence significative n'a été observée. L'interaction double Groupe x Type était significative seulement sur C3.

Les résultats de la décomposition de l'interaction significative Groupe x Type à la position de l'électrode C3 ont montré que la latence de N2 avec le stimulus verbal /ba/ était significativement plus longue chez les enfants malentendants que chez leurs

pairs normo-entendants ($[F(1, 22) = 7, p < .05]$). Aucune différence significative n'a été trouvée entre les deux groupes avec le stimulus non verbal /ba/ [$F(1, 22) = 3.2, p = .09$] ou le son pur de 1 kHz [$F(1, 22) = .02, p = .9$].

Tableau VII. Résultats de l'analyse de variance entre le groupe d'enfants (malentendants et normo-entendants), le type du stimulus (verbal /ba/, non verbal /ba/ et le son pur de 1 kHz) et le site d'électrodes (FCz, Cz, CPz, C3 et C4), avec des mesures répétées pour Type et Électrode. L'analyse a été effectuée pour la valeur de la latence et de l'amplitude des ondes P1 et N2.

| | P1 | | | | N2 | | | |
|-----------------------|-------------------|-------------------|------|------|-------------------|-------------------|-------|------|
| | dl | dl | F | p < | dl | dl | F | p < |
| | (inter groupe) | (intra groupe) | | | (inter groupe) | (intra groupe) | | |
| Latence | | | | | | | | |
| Type | 1.3 | 44 | 9.4 | .001 | 2 | 44 | 9.8 | .001 |
| Électrode | 2.2 | 47.9 | 0.51 | NS | 2.8 | 62.1 | 2.9 | .05 |
| Groupe | 1 | 22 | 0.3 | NS | 1 | 22 | 1.73 | NS |
| Type*Électrode | 3.23 | 71.13 | 1.36 | NS | 4.2 | 92.8 | 1.8 | NS |
| Type*Groupe | 2 | 44 | 0.9 | NS | 2 | 44 | 0.8 | NS |
| Électrode*Groupe | 4 | 88 | 0.84 | NS | 4 | 88 | 1.5 | NS |
| Type*Électrode*Groupe | 8 | 176 | 1.5 | NS | 8 | 176 | 2.7 | .01 |
| Amplitude | | | | | | | | |
| Type | 2 | 44 | .57 | NS | 2 | 44 | 27.23 | .001 |
| Électrode | 2.4 | 52.6 | 28.3 | .001 | 2.5 | 55.4 | 50.11 | .001 |
| Groupe | 1 | 22 | .6 | NS | 1 | 22 | 9.3 | .01 |
| Type*Électrode | 4.45 | 97.95 | .36 | NS | 5.2 | 116.3 | 6.44 | .001 |
| Type*Groupe | 2 | 44 | .6 | NS | 2 | 44 | .52 | NS |
| Électrode*Groupe | 4 | 88 | .53 | NS | 4 | 88 | .77 | NS |
| Type*Électrode*Groupe | 8 | 176 | 1.2 | NS | 8 | 176 | 1.7 | NS |

dl = Degré de liberté, NS = Non significatif ($p > .05$)

Tableau VIII. Résultats de l'analyse de variance entre le groupe d'enfants (malentendants et ayant un trouble de traitement auditif), le type du stimulus (verbal /ba/, non verbal /ba/ et le son pur de 1 kHz) et le site d'électrodes (FCz, Cz, CPz, C3 et C4), avec des mesures répétées pour Type et Électrode. L'analyse a été effectuée pour la valeur de la latence et de l'amplitude des ondes P1 et N2.

| | P1 | | | | N2 | | | |
|-----------------------|-------------------------|-------------------------|------|------|-------------------------|-------------------------|------|------|
| | dl (inter groupe) | dl (intra groupe) | F | p < | dl (inter groupe) | dl (intra groupe) | F | p < |
| Latence | | | | | | | | |
| Type | 1.14 | 22.84 | 3.06 | NS | 1.2 | 24.14 | 18.1 | .001 |
| Électrode | 2.7 | 53.23 | 0.53 | NS | 4 | 80 | 3.6 | .01 |
| Groupe | 1 | 20 | 0.3 | NS | 1 | 20 | 0.1 | NS |
| Type*Électrode | 3.7 | 73.44 | 1.4 | NS | 4.35 | 87.13 | 0.44 | NS |
| Type*Groupe | 2 | 40 | 2.32 | NS | 2 | 40 | 0.01 | NS |
| Électrode*Groupe | 4 | 80 | 0.53 | NS | 4 | 80 | 0.51 | NS |
| Type*Électrode*Groupe | 8 | 160 | 0.23 | NS | 8 | 160 | .97 | NS |
| Amplitude | | | | | | | | |
| Type | 2 | 40 | 0.19 | NS | 2 | 40 | 22.8 | .001 |
| Électrode | 2.5 | 49.2 | 27.2 | .001 | 2.7 | 54.69 | 34.4 | .001 |
| Groupe | 1 | 20 | 0.83 | NS | 1 | 20 | 3.7 | NS |
| Type*Électrode | 8 | 160 | 1.8 | NS | 4.7 | 95.2 | 7.4 | .001 |
| Type*Groupe | 2 | 40 | 1 | NS | 2 | 40 | 1 | NS |
| Électrode*Groupe | 4 | 80 | 0.31 | NS | 4 | 80 | 2.03 | NS |
| Type*Électrode*Groupe | 8 | 160 | 1.03 | NS | 8 | 160 | 1 | NS |

dl = Degré de liberté, NS = Non significatif ($p > .05$)

Tableau IX. Résultats de la décomposition de l'interaction triple (Groupe x Type du stimulus x Électrode). L'analyse a été effectuée pour la valeur de la latence de l'onde N2.

| | | dl | dl | F | <i>p</i> < |
|----------------------|-----|-------------------|-------------------|------|------------|
| | | (inter groupe) | (intra groupe) | | |
| Type | FCz | 2 | 44 | 7.9 | .001 |
| | Cz | 2 | 44 | 6 | .01 |
| | CPz | 2 | 44 | 4.4 | .01 |
| | C3 | 2 | 44 | 3.2 | .05 |
| | C4 | 2 | 44 | 11.6 | .001 |
| Groupe | FCz | 1 | 22 | 1.5 | NS |
| | Cz | 1 | 22 | 1.2 | NS |
| | CPz | 1 | 22 | 2.35 | NS |
| | C3 | 1 | 22 | 2.9 | NS |
| | C4 | 1 | 22 | .4 | NS |
| Type x Groupe | FCz | 2 | 44 | 1 | NS |
| | Cz | 2 | 44 | 2.6 | NS |
| | CPz | 2 | 44 | .14 | NS |
| | C3 | 2 | 44 | 3.9 | .05 |
| | C4 | 2 | 44 | .45 | NS |

dl = Degré de liberté, NS = Non significatif ($p > .05$)

3.4.1.4. Distribution de l'activité corticale

3.4.1.4.1. Onde P1

Dans l'article 2, nous avons comparé la distribution de l'activité corticale de l'onde N2 et de l'onde de ND entre les enfants malentendants et les deux autres groupes d'enfants (normo-entendants et ceux ayant un TTA). Bien que l'analyse statistique n'ait pas révélé de différences significatives en lien avec la valeur de la latence et celle d'amplitude de l'onde P1 entre les trois groupes, nous avons exploré la distribution corticale de cette onde mesurée chez les trois groupes.

À partir des données de chaque groupe, nous avons sélectionné le pic le plus positif pour l'onde P1 sur les tracés de chaque stimulus fréquent. La figure 6 illustre la distribution de l'activité corticale associée à l'onde P1 lorsque les stimuli fréquents – son pur de 1 kHz, non verbal /ba/ et verbal /ba/ – ont été utilisés. L'activité corticale de l'onde P1 se situe dans la région frontale, chez les trois groupes.

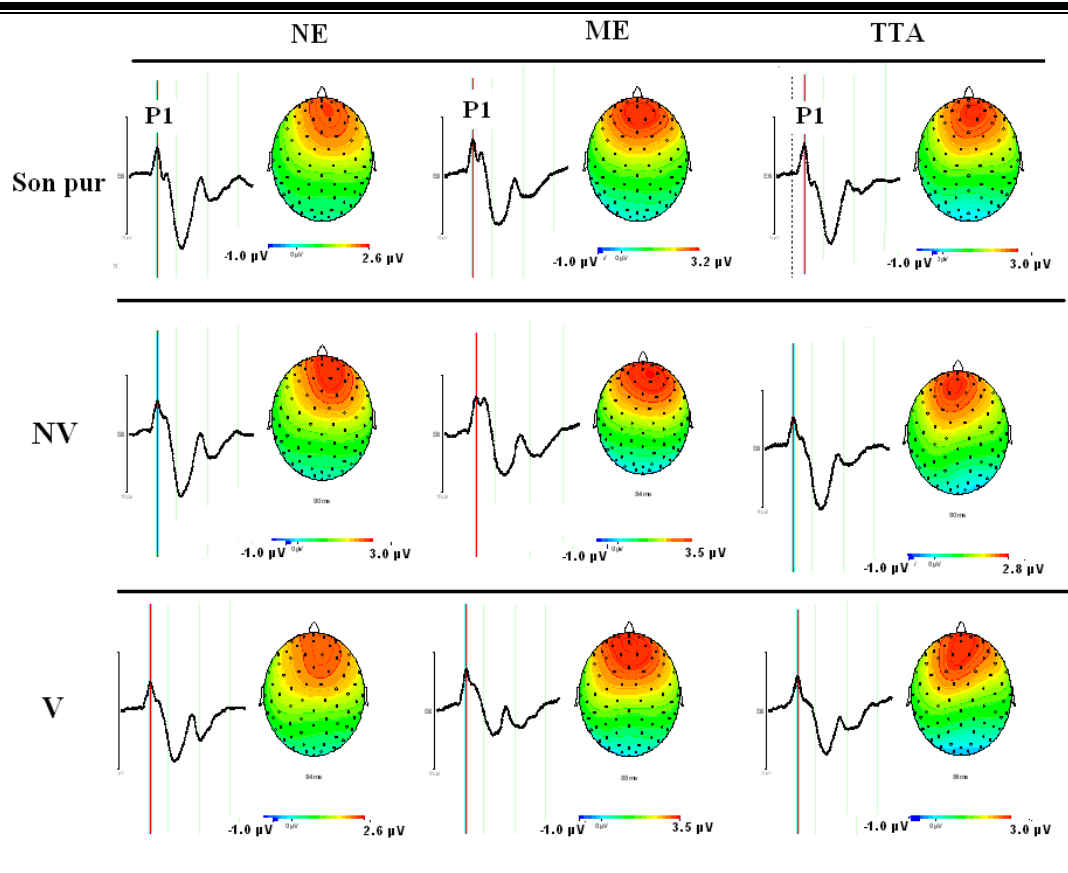


Figure 6. Topographie de l'activité corticale reliée à l'onde P1 générée par le son pur de 1 kHz (son pur), le stimulus non verbal /ba/ (NV) et le stimulus verbal /ba/ (V), chez les trois groupes de participants – normo-entendants (NE), malentendants (ME) et ceux ayant un trouble de traitement auditif (TTA).

3.4.1.4.2. Comparaison de la distribution corticale de l'onde N2 entre les enfants malentendants et normo-entendants

La figure 7 montre la provenance de l'activité corticale responsable de la formation de l'onde N2 lorsque le stimulus fréquent – son pur de 1 kHz, non verbal /ba/ et verbal /ba/– a été utilisé. L'activité corticale de l'onde N2 se situe dans la région frontale, chez les deux groupes. Cependant, l'activité corticale responsable de l'onde N2 avec le stimulus verbal est légèrement latéralisée vers la droite chez les enfants malentendants.

3.4.1.4.3. Comparaison de la distribution corticale de l'onde N2 entre les enfants malentendants et ayant un trouble de traitement auditif

Nous avons comparé la topographie de l'activité corticale des enfants malentendants et celle des enfants ayant un TTA. L'activité corticale reliée à l'apparition de l'onde N2 a été illustrée dans la figure 8 avec les trois stimuli fréquents (son pur de 1 kHz, non verbal /ba/ et verbal /ba/). Cette activité se situe dans la région similaire chez les deux groupes, soit la région frontale. Toutefois, comme montré dans la figure 8, il y a une légère latéralisation vers la droite chez les enfants malentendants lorsque l'activité corticale a été enregistrée avec le stimulus verbal.

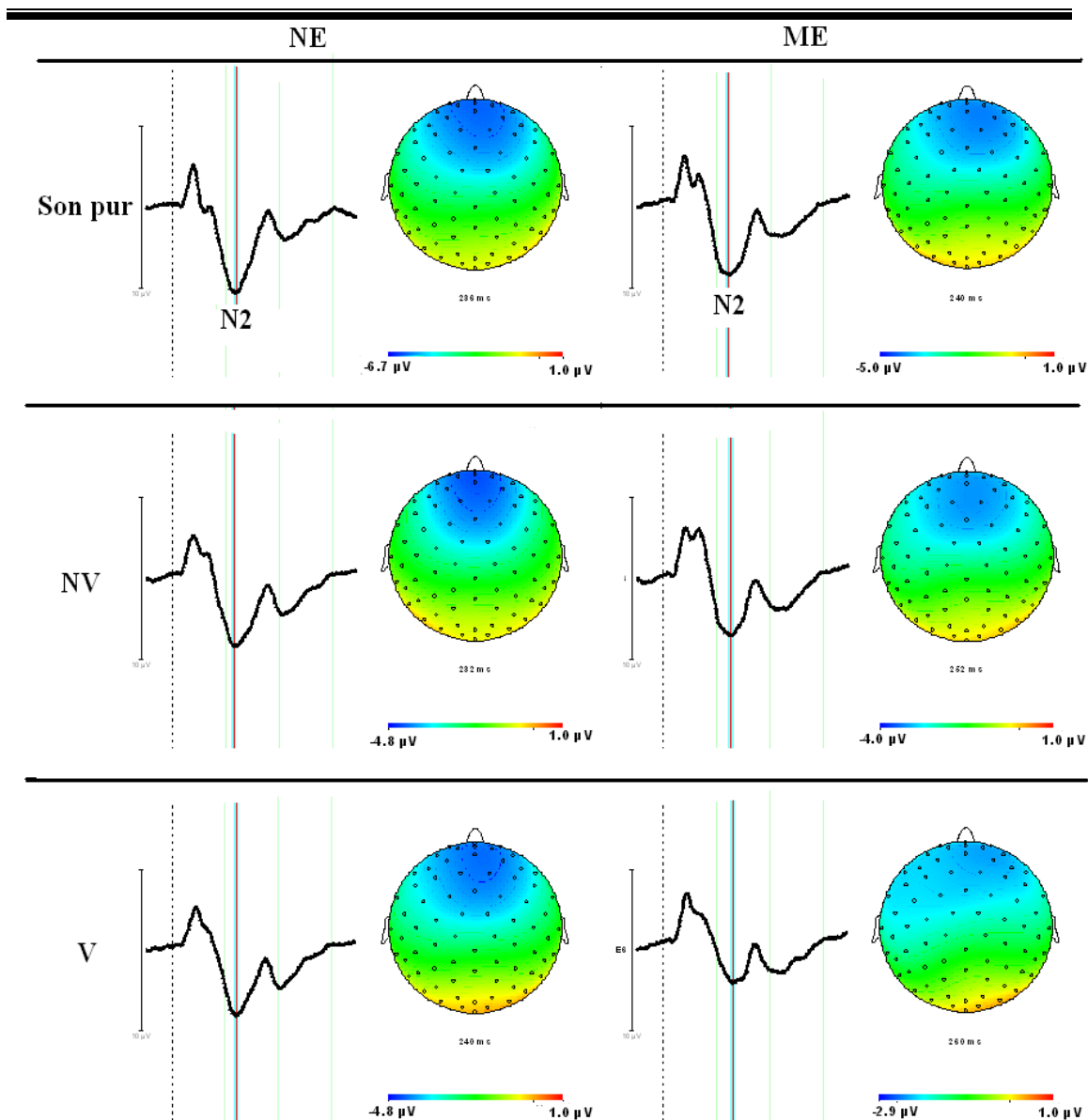


Figure 7. Topographie de l'activité corticale liée à l'onde N2 générée par le son pur de 1 kHz (son pur), le stimulus non verbal /ba/ (NV) et le stimulus verbal /ba/ (V), chez les participants normo-entendants (NE) et malentendants (ME).

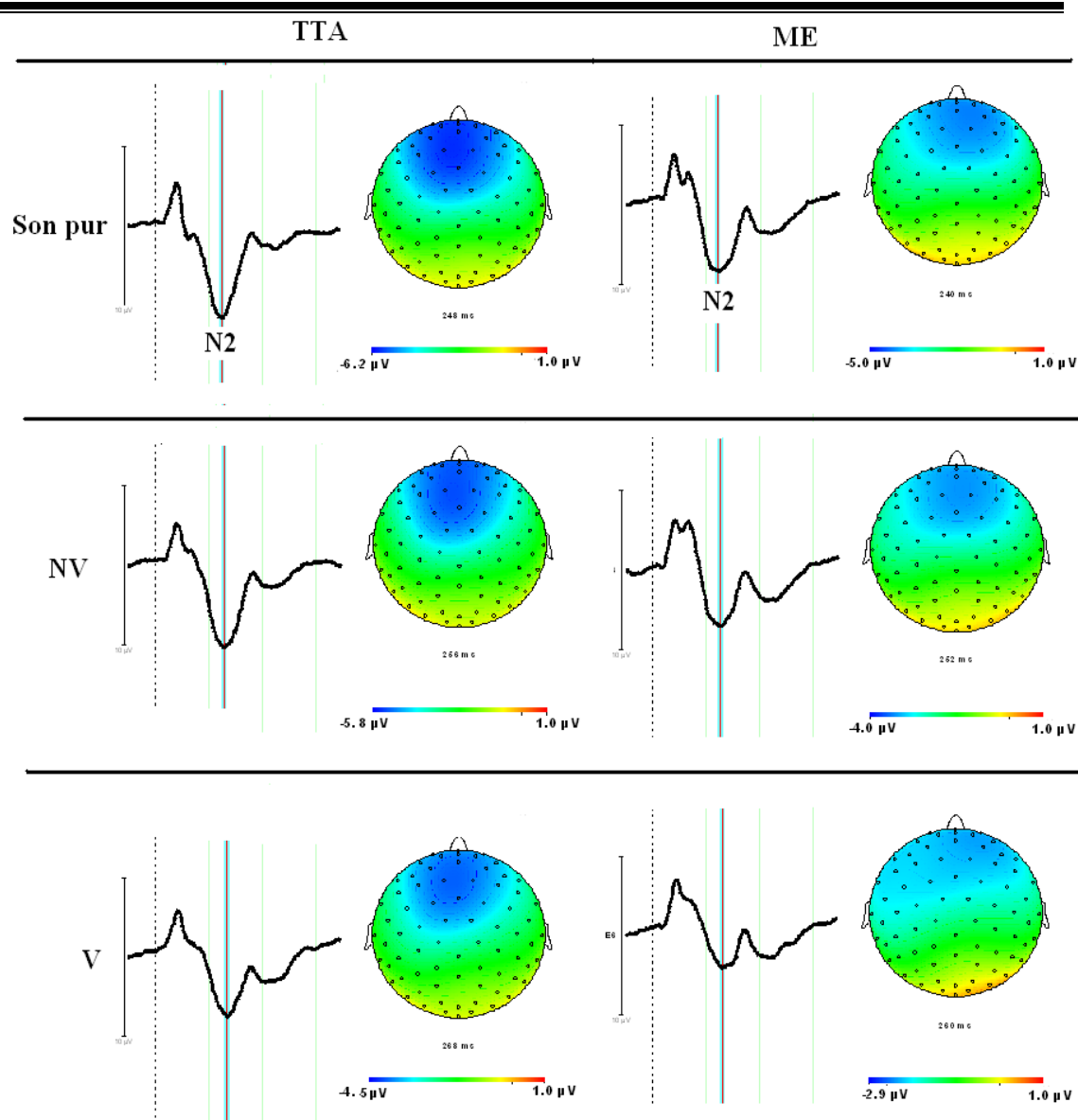


Figure 8. Topographie de l'activité corticale liée à l'onde N2 générée par le son pur de 1 kHz (son pur), le stimulus non verbal /ba/ (NV) et le stimulus verbal /ba/ (V), chez les participants ayant un trouble de traitement auditif (TTA) et malentendants (ME).

3.4.1.5. Analyse de données provenant des stimuli rares

Jusqu'à maintenant, nous avons rapporté les données électrophysiologiques obtenues avec les stimuli fréquents. Dans la présente section, nous présenterons les données provenant des tracés enregistrés avec les stimuli rares. De façon générale, l'analyse statistique des résultats provenant des tracés rares est similaire à celle venant des tracés fréquents (voir Tableaux II et X). Seuls les résultats obtenus avec les stimuli rares différents de ceux provenant de stimuli fréquents seront détaillés.

Pour la latence et l'amplitude des ondes P1 et N2 enregistrées avec les stimuli rares, nous avons effectué des analyses de variance à mesures répétées pour le groupe (normo-entendant, malentendant et TTA), le type de stimuli (verbal /da/, non verbal /da/ et son pur de 2 kHz) et le site d'électrodes (FCz, Cz, CPz, C3 et C4) (voir Tableau X).

Pour la latence de P1, une différence significative a été trouvée pour l'interaction triple (Groupe x Type x Électrode, voir Tableau X). Des analyses complémentaires ont été effectuées pour explorer la nature de l'interaction triple (voir Tableau XI). Pour chaque site d'électrodes, une analyse de variance avec les facteurs Type et Groupe a été réalisée. Le facteur Type était significatif pour tous les sites d'électrodes. Aucune différence significative n'a été observée pour le facteur Groupe à chaque site d'électrodes. Pour l'interaction double Groupe x Type, une différence significative a été observée uniquement pour l'électrode C4 [$F(4, 74) = 3.3, p < .05$] (voir Tableau XI).

Tableau X. Résultats de l'analyse de variance entre le groupe d'enfants normo-entendants, malentendants, ayant un trouble de traitement auditif, le type du stimulus (verbal /da/, non verbal /da/ et le son pur de 2 kHz) et le site d'électrodes (FCz, Cz, CPz, C3 et C4), avec des mesures répétées pour Type et Électrode. L'analyse a été effectuée pour la valeur de la latence et de l'amplitude des ondes P1 et N2 sur les tracés rares.

| | P1 | | | | N2 | | | |
|-----------------------|-------------------------|-------------------------|-------|------|-------------------------|-------------------------|------|------|
| | dl (inter groupe) | dl (intra groupe) | F | p < | dl (inter groupe) | dl (intra groupe) | F | p < |
| Latence | | | | | | | | |
| Type | 2 | 74 | 12.06 | .001 | 2 | 74 | 39 | .001 |
| Électrode | 4 | 148 | 4.51 | .01 | 2.6 | 94.84 | 0.6 | NS |
| Groupe | 2 | 37 | .38 | NS | 2 | 37 | 3.3 | .05 |
| Type*Électrode | 5.14 | 190.15 | .94 | NS | 5.3 | 195.1 | 0.95 | NS |
| Type*Groupe | 4 | 74 | 1.13 | NS | 4 | 74 | 0.6 | NS |
| Électrode*Groupe | 8 | 148 | .3 | NS | 8 | 148 | .75 | NS |
| Type*Électrode*Groupe | 16 | 296 | 1.84 | .05 | 16 | 296 | 1.1 | NS |
| Amplitude | | | | | | | | |
| Type | 2 | 74 | 1.85 | NS | 2 | 74 | 6.03 | .01 |
| Électrode | 3.2 | 117.7 | 40.3 | .001 | 2.7 | 100.1 | 40 | .001 |
| Groupe | 2 | 37 | .1 | NS | 2 | 37 | 5.80 | .01 |
| Type*Électrode | 5.7 | 210.03 | .47 | NS | 5.4 | 199 | 2.25 | .05 |
| Type*Groupe | 4 | 74 | .13 | NS | 4 | 74 | 3.23 | .01 |
| Électrode*Groupe | 8 | 148 | .55 | NS | 8 | 148 | 1.4 | NS |
| Type*Électrode*Groupe | 16 | 296 | .72 | NS | 16 | 296 | 1.3 | NS |

dl = Degré de liberté, NS = Non significatif ($p > .05$)

Tableau XI. Résultats de la décomposition de l'interaction triple (Groupe x Type du stimulus x Électrode). L'analyse a été effectuée pour la valeur de la latence de l'onde P1.

| Latence de l'onde P1 | | dl | dl | F | p< |
|----------------------|-----|-------------------|-------------------|------|------|
| | | (inter groupe) | (intra groupe) | | |
| Type | FCz | 2 | 74 | 11.9 | .001 |
| | Cz | 2 | 74 | 12.3 | .001 |
| | CPz | 2 | 74 | 6.2 | .001 |
| | C3 | 2 | 74 | 7.3 | .001 |
| | C4 | 2 | 74 | 11.8 | .001 |
| Groupe | FCz | 2 | 37 | .23 | NS |
| | Cz | 2 | 37 | .4 | NS |
| | CPz | 2 | 37 | .5 | NS |
| | C3 | 2 | 37 | .43 | NS |
| | C4 | 2 | 37 | .33 | NS |
| Type x Groupe | FCz | 4 | 74 | 1 | NS |
| | Cz | 4 | 74 | 1.4 | NS |
| | CPz | 4 | 74 | .76 | NS |
| | C3 | 4 | 74 | .4 | NS |
| | C4 | 4 | 74 | 3.3 | .05 |

dl = Degré de liberté, NS = Non significatif ($p > .05$)

Selon le *test-t* avec la correction *Bonferroni* ($p < .016$) sur tous les sites d'électrodes, la latence de P1 était significativement plus longue avec le stimulus verbal /da/ par rapport au stimulus son pur de 2 kHz. Les résultats ont également démontré qu'aux sites FCz et CPz, la latence de P1 était significativement plus longue avec le stimulus verbal /da/ que le stimulus non verbal /da/ (voir Tableau XII). Les

résultats de la décomposition de l'interaction significative Groupe x Type en C4 n'ont montré aucune différence significative entre les groupes pour la latence de P1 avec les trois stimuli.

Tableau XII. Résultats des tests t pour le site d'électrodes FCz, Cz, CPz, C3 et C4. L'analyse a été effectuée pour la valeur de la latence de l'onde P1.

| Latence de l'onde P1 | | | |
|--|----|-----|------|
| | dl | t | p< |
| Verbal /da/ versus non verbal /ba/ en | | | |
| FCz | 39 | 2.6 | .016 |
| Cz | 39 | 2.3 | .016 |
| CPz | 39 | 2.9 | .016 |
| C3 | 39 | 1.6 | .016 |
| Verbal /da/ versus son pur 1 kHz en | | | |
| FCz | 39 | 4.5 | .016 |
| Cz | 39 | 4.8 | .016 |
| CPz | 39 | 3.3 | .016 |
| C3 | 39 | 3.9 | .016 |
| Non verbal /da/ versus son pur 1 kHz en | | | |
| FCz | 39 | 2.4 | NS |
| Cz | 39 | 2.3 | NS |
| CPz | 39 | .99 | NS |
| C3 | 39 | 2.3 | NS |

dl = Degré de liberté, NS = Non significatif ($p > .016$ à cause de correction Bonferroni)

Pour l'amplitude de N2, l'interaction Type et Groupe est significative. Les résultats de la décomposition de cette interaction ont démontré que le facteur du Groupe était significatif seulement pour le son pur de 2 kHz [$F(2, 37) = 7.91, p < 0.001$].

Le *test-t* avec la correction *Bonferroni* ($p < .016$) ont démontré que l'amplitude de N2 avec le son pur de 2 kHz était significativement plus grande chez les enfants normo-entendants par rapport aux deux autres groupes : enfants malentendants [$t(26) = 3.76, p < .016$] et enfants ayant un TTA [$t(26) = 2.82, p < .016$].

3.4.2. Croisement entre les résultats des deux études

Dans le but d'explorer une relation entre les deux outils expérimentaux utilisés dans la présente thèse, nous avons examiné le croisement entre les résultats de l'étude comportementale et de l'étude en électrophysiologie.

3.4.2.1. Relation entre la discrimination active et passive

Comme présenté dans l'article 1, les enfants de trois groupes ont été soumis préalablement aux tâches de discrimination et d'identification auditives avant de effectuer le test d'OSA. De plus, nous avons mentionné dans l'introduction du présent chapitre que l'onde de ND peut être considérée comme une mesure de discrimination passive (Näätänen, 1990, 1992). Nous avons donc comparé la performance de tous les enfants lors de la tâche de discrimination auditive de la mesure comportementale (discrimination active) ainsi que la présence ou l'absence de l'onde de négativité de discordance (discrimination passive) (voir Tableau XIII). Pour ce faire, nous avons choisi les deux paires de stimuli communes aux deux études : la paire verbale /ba/ et /da/ ainsi que la paire non verbaux /ba/ et /da/. Tous les enfants ont bien réussi la tâche de discrimination avec les stimuli non verbaux et verbaux /ba/ et /da/. Le taux de réussite était 87% ou plus (13 ou plus sur 15). Toutefois, l'onde de ND n'était pas présente chez les quarante enfants ayant participé aux deux études. Avec les stimuli non verbaux, la ND était présente chez 75 % des enfants normo-entendants (12 sur 16), chez 100 % des enfants ayant un TTA (12 sur 12) et chez 92 % des enfants malentendants (11 sur 12). Avec les stimuli verbaux, l'onde de ND était présente chez

près de 70% des enfants normo-entendants (11 sur 16), chez 58 % des enfants ayant un TTA (7 sur 12) et 75 % des enfants malentendants (9 sur 12).

Tableau XIII. Pourcentage de bonnes réponses obtenu au test de discrimination auditive active (D) des stimuli verbaux /ba/-/da/ (V) et des stimuli non verbaux /ba/-/da/ (NV) ainsi que la présence (P) ou l'absence (A) de l'onde de négativité de discordance (ND) avec les mêmes stimuli enregistrés chez les enfants normo-entendants (NE), malentendants (ME) et les enfants ayant trouble de traitement auditif (TTA). NO : numéro du participant.

| NO | NE | | | | ME | | | | TTA | | | |
|----|-----|----|-----|----|-----|----|-----|----|-----|----|-----|----|
| | V | | NV | | V | | NV | | V | | NV | |
| | D | ND | D | ND | D | ND | D | ND | D | ND | D | ND |
| 1 | 100 | A | 100 | P | 100 | P | 93 | P | 100 | A | 100 | P |
| 2 | 90 | P | 93 | P | 100 | P | 97 | P | 100 | P | 97 | P |
| 3 | 100 | P | 100 | A | 87 | P | 100 | P | 100 | P | 93 | P |
| 4 | 100 | P | 100 | P | 90 | A | 100 | P | 97 | A | 93 | P |
| 5 | 93 | A | 90 | P | 97 | P | 93 | P | 100 | A | 93 | P |
| 6 | 93 | A | 93 | A | 87 | P | 100 | P | 100 | A | 100 | P |
| 7 | 93 | A | 100 | P | 100 | A | 97 | P | 93 | P | 90 | P |
| 8 | 100 | P | 100 | A | 100 | P | 97 | A | 90 | P | 90 | P |
| 9 | 100 | P | 97 | A | 93 | P | 97 | P | 93 | P | 87 | P |
| 10 | 100 | P | 100 | P | 100 | P | 97 | P | 87 | P | 87 | P |
| 11 | 100 | P | 90 | P | 87 | P | 87 | P | 100 | P | 100 | P |
| 12 | 100 | P | 93 | P | 87 | A | 97 | P | 100 | A | 100 | P |
| 13 | 93 | A | 100 | P | | | | | | | | |
| 14 | 100 | P | 100 | P | | | | | | | | |
| 15 | 100 | P | 100 | P | | | | | | | | |
| 16 | 100 | P | 100 | P | | | | | | | | |

3.4.2.2. Corrélation entre la tâche d'organisation séquentielle auditive et les caractéristiques de l'onde N2

Selon les résultats de l'étude 1, les enfants malentendants montraient des performances inférieures à celles des deux autres groupes de participants lors des tâches d'OSA avec les stimuli verbaux /ba/ et /da/. Quant aux résultats de l'étude 2, ils révélaient que les enfants malentendants avaient une amplitude réduite de N2. Nous avons donc examiné la relation entre ces deux tests chez les trois groupes d'enfants et également chez les enfants malentendants de façon plus spécifique.

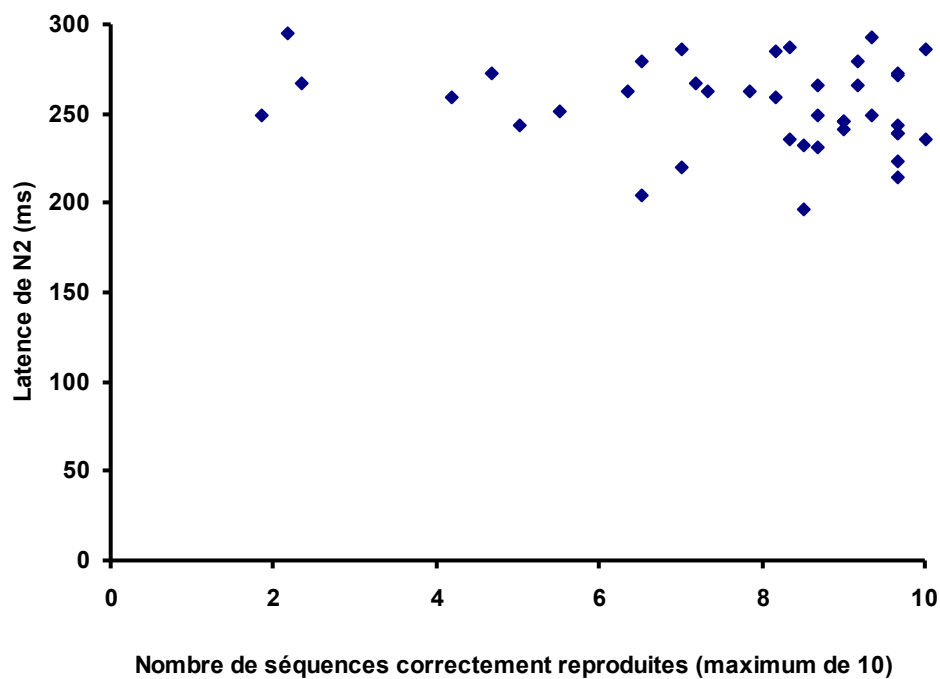


Figure 9. Corrélation entre la latence de l'onde N2 et la tâche d'organisation séquentielle auditive (OSA) avec les stimuli verbaux (moyenne de deux, trois et cinq éléments par séquence) calculée à partir des données des 40 participants.

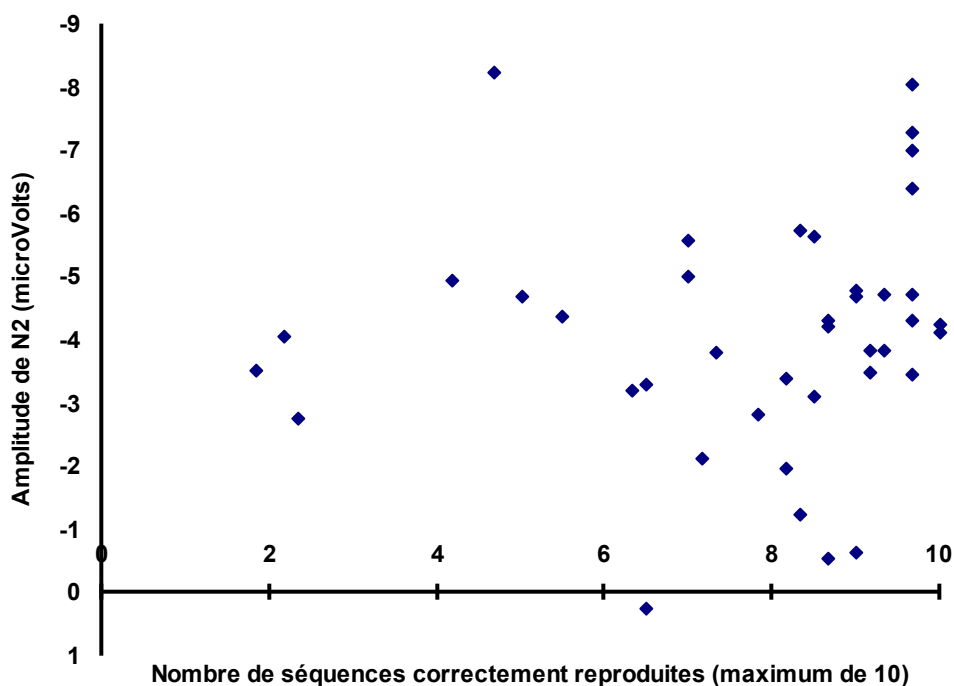


Figure 10. Corrélation entre l'amplitude de l'onde N2 et la tâche d'organisation séquentielle auditive (OSA) avec les stimuli verbaux (moyenne de deux, trois et cinq éléments par séquence) calculée à partir des données des 40 participants.

3.4.2.2.1. Analyse des trois groupes

La corrélation entre la tâche d'organisation séquentielle auditive (OSA) avec les stimuli verbaux (moyenne de deux, trois et cinq éléments par séquence ou l'intervalle interstimuli de 20, 425 et 1000 ms) et la latence de l'onde N2 (Figures 9 et 11) et l'amplitude de l'onde N2 (Figures 10 et 12) a été étudiée chez tous les trois groupes de participants. Aucune corrélation significative n'a été trouvée entre la tâche d'OSA et la latence de l'onde N2 pour le nombre d'éléments en séquence [$n=40$ $r = .2$, $p = .24$] et pour l'intervalle interstimuli [$n=40$ $r = .2$, $p = .23$] de même que pour l'amplitude de

l'onde N2 pour le nombre d'éléments en séquence [n=40 $r = .1$, $p = .53$] que pour l'intervalle interstimuli [n=40 $r = .18$, $p = .27$].

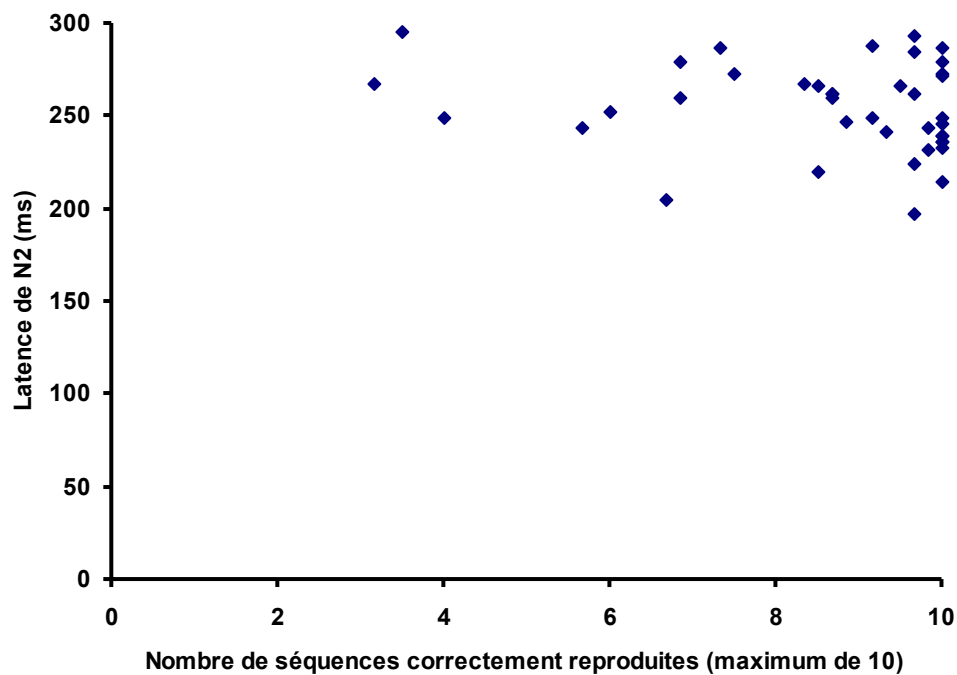


Figure 11. Corrélation entre la latence de l'onde N2 et la tâche d'organisation séquentielle auditive (OSA) avec les stimuli verbaux (moyenne de 20, 425 et 1000 ms) calculée à partir des données des 40 participants.

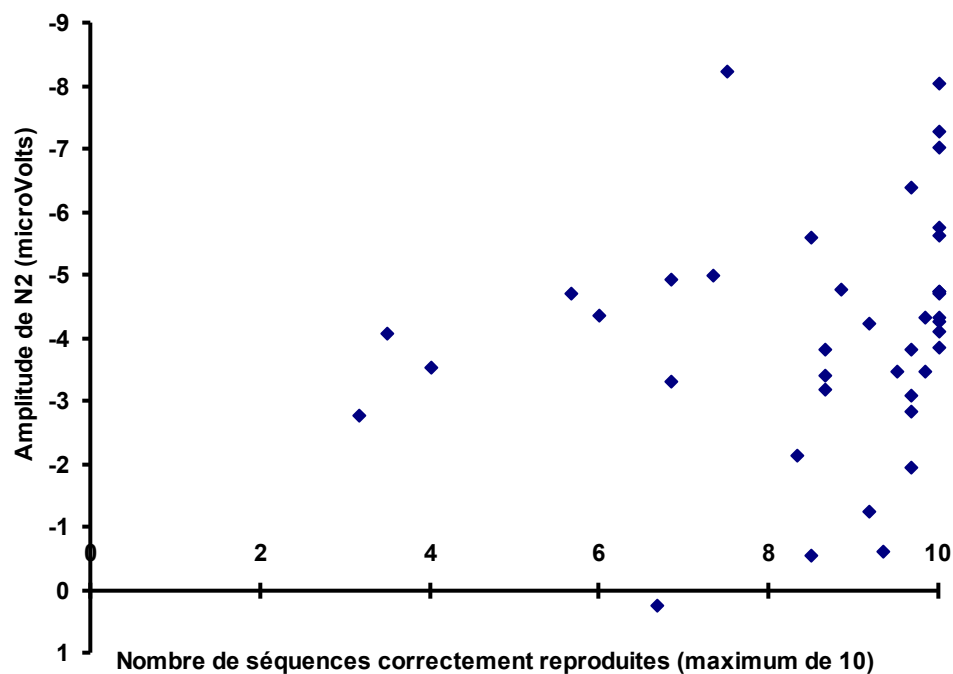


Figure 12. Corrélation entre l'amplitude de l'onde N2 et la tâche d'organisation séquentielle auditive (OSA) avec les stimuli verbaux (moyenne de 20, 425 et 1000 ms) calculée à partir des données des 40 participants.

3.4.2.2.2. Analyse des enfants malentendants

Nous avons étudié également la corrélation entre la tâche d'organisation séquentielle auditive et les caractéristiques de l'onde N2 chez le groupe d'enfants malentendants (voir Figures 13, 14, 15, 16).

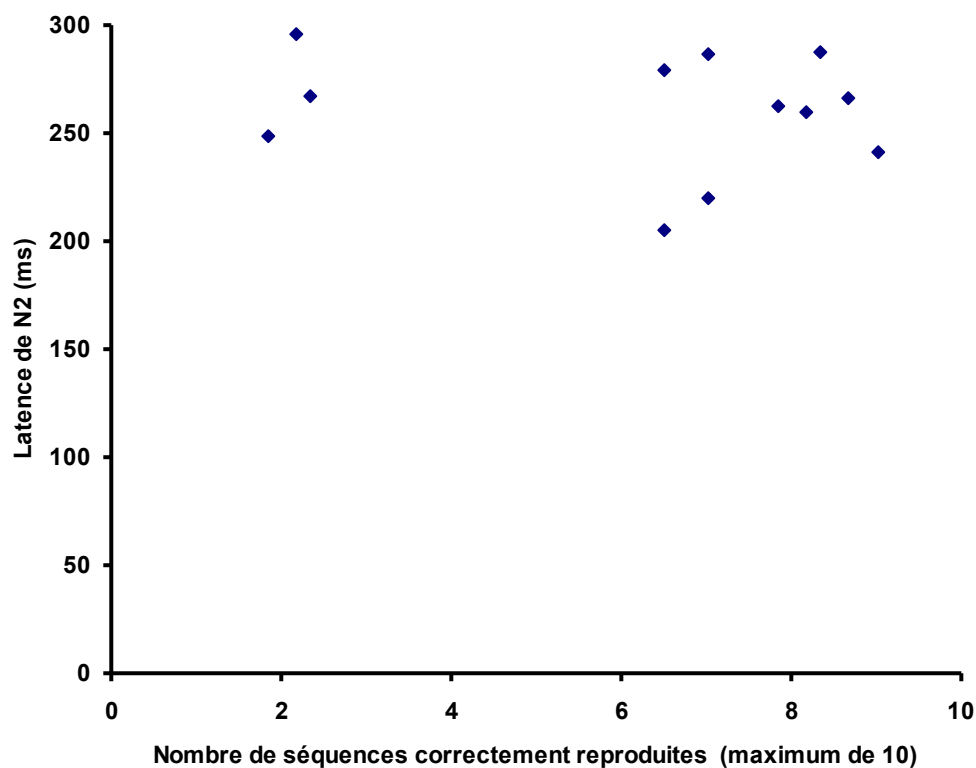


Figure 13. Corrélation entre la latence de l'onde N2 et la tâche d'organisation séquentielle auditive (OSA) avec les stimuli verbaux (moyenne de deux, trois et cinq éléments par séquence) calculée à partir des données des 12 participants.

Aucune corrélation significative n'a été observée entre les deux mesures : tâche d'OSA (moyenne de deux, trois et cinq éléments par séquence) et la latence de l'onde N2 [$n=12$, $r = .15$, $p = .6$] et l'amplitude de l'onde N2 [$n=12$, $r = .35$, $p = .26$]. Avec les trois IIS (20, 425, 1000 ms), la corrélation n'était pas significative entre le test d'OSA et la latence de l'onde N2 [$n=12$, $r = .18$, $p = .58$] et l'amplitude de l'onde N2 [$n=12$, $r = .24$, $p = .45$].

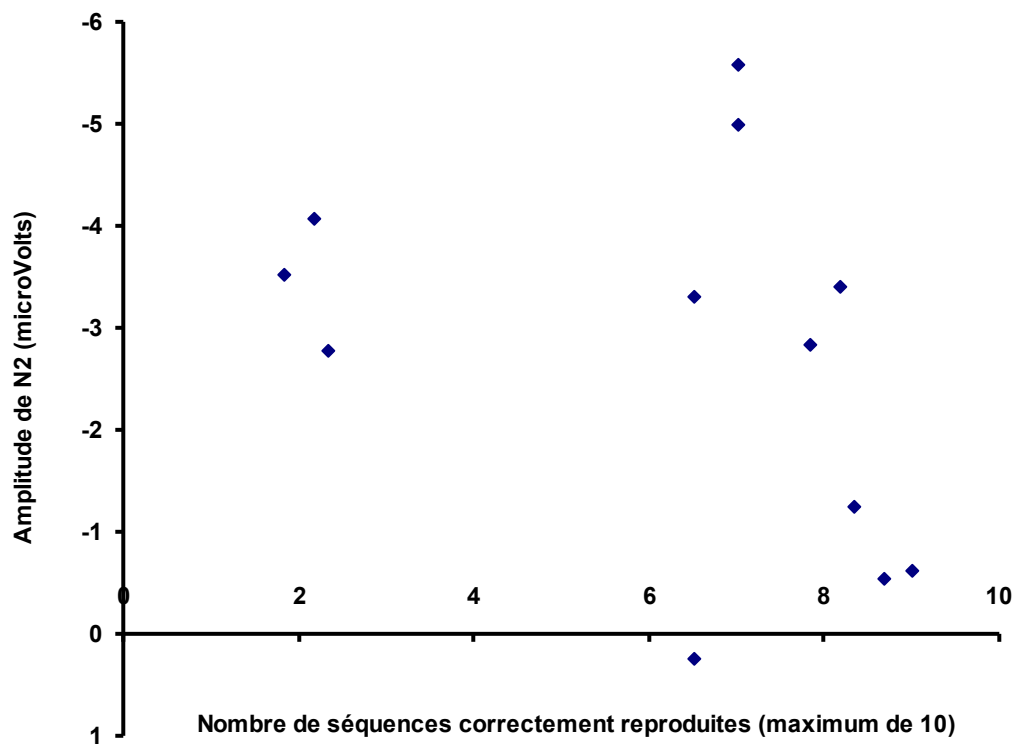


Figure 14. Corrélation entre l'amplitude de l'onde N2 et la tâche d'organisation séquentielle auditive (OSA) avec les stimuli verbaux (moyenne de deux, trois et cinq éléments par séquence) calculée à partir des données des 12 participants.

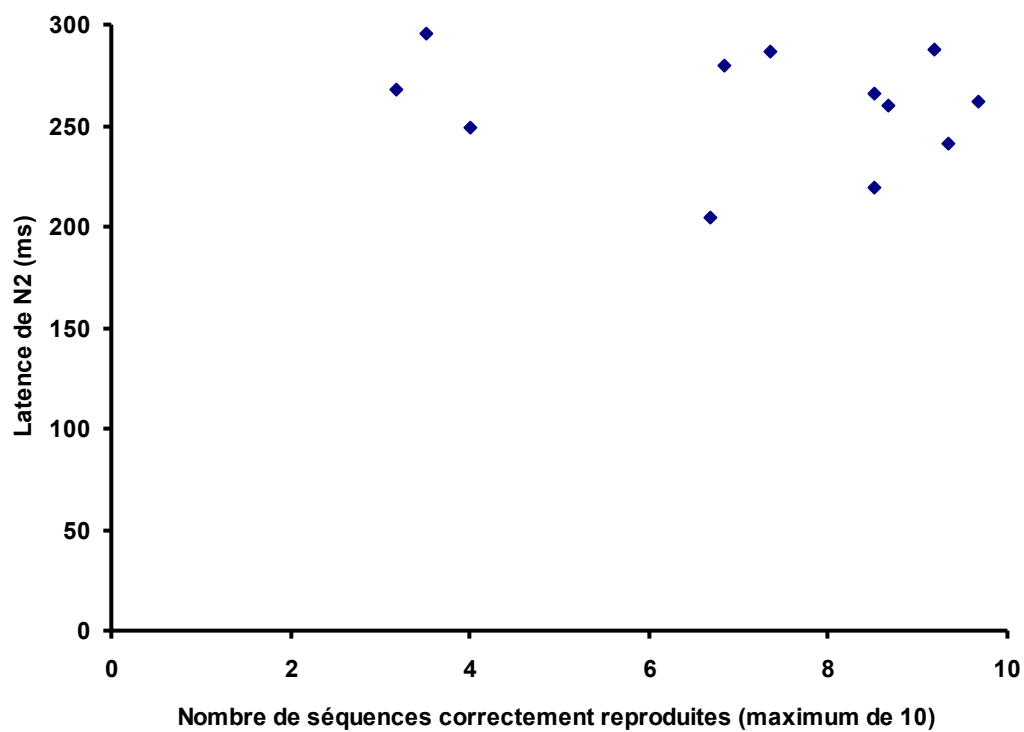


Figure 15. Corrélation entre la latence de l'onde N2 et la tâche d'organisation séquentielle auditive (OSA) avec les stimuli verbaux (moyenne de 20, 425 et 1000 ms) calculée à partir des données des 12 participants.

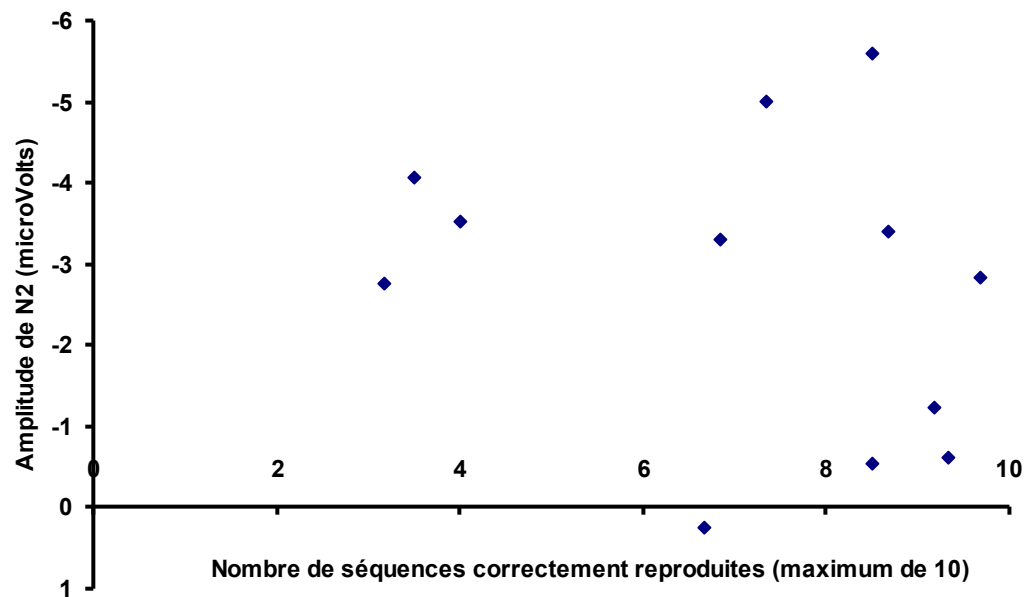


Figure 16. Corrélation entre l'amplitude de l'onde N2 et la tâche d'organisation séquentielle auditive (OSA) avec les stimuli verbaux (moyenne de 20, 425 et 1000 ms) calculée à partir des données des 12 participants.

Chapitre 4

4. Discussion générale

4.1. Trouble spécifique de traitement auditif chez les enfants malentendants

L'objectif général de la présente thèse visait à mieux comprendre l'effet d'une perte auditive périphérique sur les habiletés auditives centrales d'enfants d'âge scolaire, porteurs d'appareils auditifs. Dans les deux études de cette thèse, les résultats d'enfants malentendants ont été comparés à ceux d'enfants normo-entendants et à ceux d'enfants ayant un trouble de traitement auditif (TTA). L'ensemble des résultats renforce l'hypothèse selon laquelle des enfants malentendants ont un trouble spécifique de traitement auditif.

Dans les prochains paragraphes, nous discuterons des résultats obtenus lors des mesures comportementales et électrophysiologiques. Par la suite, nous abordons la relation existante entre les deux mesures utilisées dans cette étude.

4.1.1. Mesures comportementales

L'analyse des données recueillies lors des mesures comportementales révèle que la différence entre les performances des enfants malentendants et celles des enfants entendants est nettement plus importante avec les stimuli verbaux /ba/ et /da/ qu'avec les stimuli non verbaux et les stimuli verbaux /a/ et /da/. Les difficultés des enfants malentendants avec la paire /ba/ et /da/ ont été également démontrées dans les études de Jutras & Gagné (1999) et Koravand et al., (2010). De plus, la comparaison entre les performances des enfants malentendants et celles des enfants ayant un TTA, suggère que la source des difficultés des deux groupes à exécuter des tâches d'organisation séquentielle auditive est de nature différente. En effet, les difficultés d'organisation

séquentielle auditive des enfants malentendants seraient reliées au type de stimuli, tandis que celles des enfants ayant un TTA seraient associées davantage à la tâche demandée. Les difficultés d'organisation séquentielle auditive des enfants malentendants, associées spécifiquement à la paire /ba/ et /da/, suggèrent que ce problème n'est pas relié uniquement au traitement des sons de la parole ou au traitement de stimuli complexes et acoustiquement similaires. En fait, ce sont les processus auditifs centraux des enfants malentendants qui seraient moins efficaces à traiter des stimuli verbaux ayant une similarité au plan acoustique. Il en serait autrement pour les enfants présentant un TTA. Leur problème particulier dans la tâche d'organisation séquentielle auditive mettrait davantage en évidence une dysfonction du système auditif central à traiter des stimuli acoustiques dans des situations d'écoute difficile, notamment lors de la réduction de l'intervalle interstimuli ou lors de l'augmentation du nombre d'éléments par séquence, indépendamment du type de stimuli utilisé.

En examinant plus en détails les données individuelles, nous constatons qu'il existe une variabilité dans les réponses des enfants des trois groupes lors de la tâche d'OSA avec les stimuli verbaux. Cette variabilité est plus importante chez les enfants malentendants que chez les enfants normo-entendants. Dans le but de mieux connaître le patron de résultats de ces enfants, nous avons transformé les données de chaque enfant malentendant en score Z. La moyenne des données des participants normo-entendants a été utilisée comme valeur de base pour calculer le score Z de chaque enfant malentendant en appliquant la formule suivante :

$$Z = \frac{x - \bar{M}}{\text{ÉT}}$$

où x est la valeur obtenue par l'enfant malentendant lors du test d'organisation séquentielle auditive, \bar{M} est la moyenne des données des participants normo-entendants et ÉT représente l'écart-type des données des participants normo-entendants.

Par exemple, si nous considérons que la moyenne des performances d'un enfant malentendant pour les séquences de deux, trois et cinq éléments (ou pour les trois IIS : 20, 425 et 1000 ms) était de 8, tandis que la moyenne des résultats de tous les enfants normo-entendants était de 9, avec un écart-type de 1, alors le score Z de l'enfant malentendant serait de -1 ($[8 - 9] / 1$). Les figures 1 et 2 regroupent les résultats de cette compilation effectuée pour les séquences ayant deux, trois et cinq éléments ou les séquences avec un IIS de 20, 425 et 1000 ms.

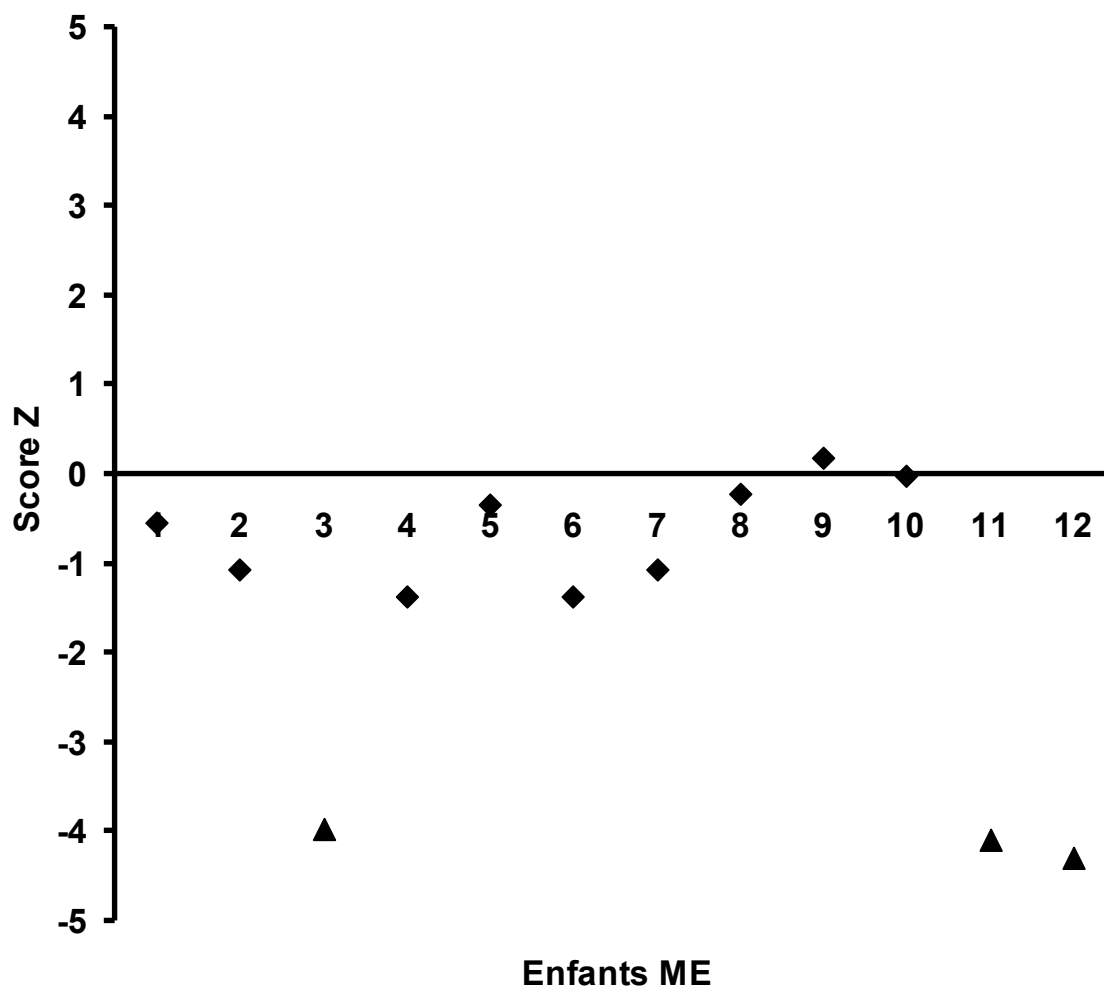


Figure 1. Score Z des 12 enfants malentendants (ME) établi à partir des résultats des 16 participants normo-entendants (moyenne de deux, trois et cinq éléments par séquence). Les trois enfants malentendants ayant le plus de difficultés dans la tâche d'organisation séquentielle auditive sont identifiés par un triangle (ME 3, ME 11 et ME 12).

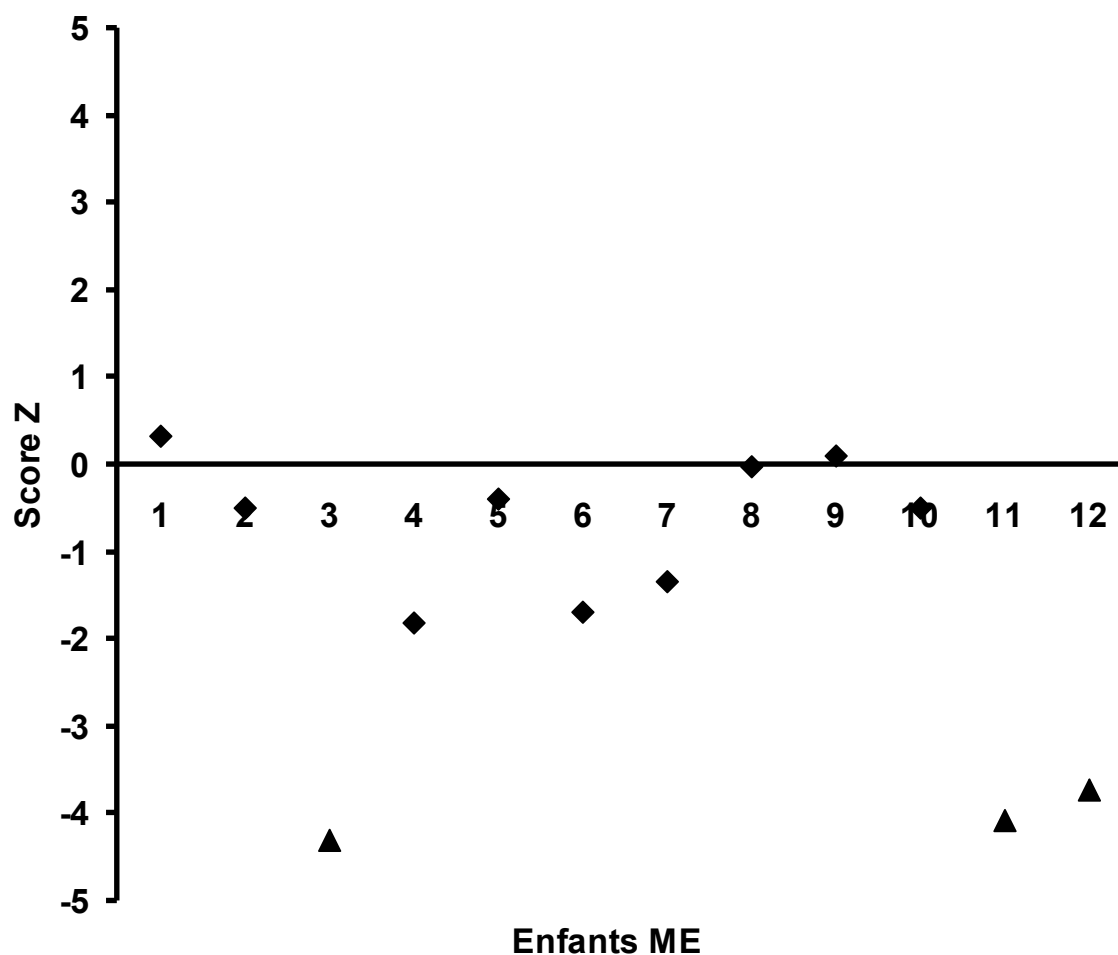


Figure 2. Score Z des 12 enfants malentendants (ME) établi à partir des résultats des 16 participants normo-entendants (moyenne de séquences des trois IIS : 20, 425 et 1000 ms). Les trois enfants malentendants ayant le plus de difficultés dans la tâche d'organisation séquentielle auditive sont identifiés par un triangle (ME 3, ME 11 et ME 12).

Les résultats présentés dans les figures 1 et 2 indiquent que trois enfants malentendants (ME 3, ME 11 et ME 12) éprouvent plus de difficultés que les autres enfants du même groupe. Nous nous sommes interrogés sur les facteurs pouvant expliquer la pauvre performance de ces trois enfants malentendants lors du test d'OSA. Dans les prochaines sections, nous discuterons des facteurs ayant pu influencer leur

performance : l'âge de l'enfant lors de l'expérimentation, le degré de surdité et la durée d'utilisation de l'appareillage auditif.

4.1.1.1. Âge lors de l'expérimentation

Nous avons cherché à déterminer si l'âge des trois enfants malentendants avait pu influencer leur performance lors des tâches d'OSA avec les stimuli verbaux. Si les trois enfants en question avaient été les plus jeunes du groupe, nous aurions pu croire que l'effet de maturation avait un rôle à jouer. En effet, Jutras & Gagné (1999) ont démontré que les enfants de six et sept ans présentent une performance inférieure à celle des enfants malentendants de neuf et dix ans. Dans notre étude, deux indices laissent croire que le facteur de l'âge n'a pas affecté les résultats aux tâches de rappel de stimuli verbaux, tel qu'illustré dans la figure 3. D'une part, les enfants ME 3 et ME 12 se trouvaient parmi les enfants les plus âgés. D'autre part, l'enfant ME 11 comptait parmi les plus jeunes de l'étude. Toutefois, il serait hasardeux d'attribuer sa faible performance à son âge étant donné que des enfants plus jeunes que lui, ME 2 et ME 5, ont obtenu des performances similaires à celles de leurs pairs normo-entendants.

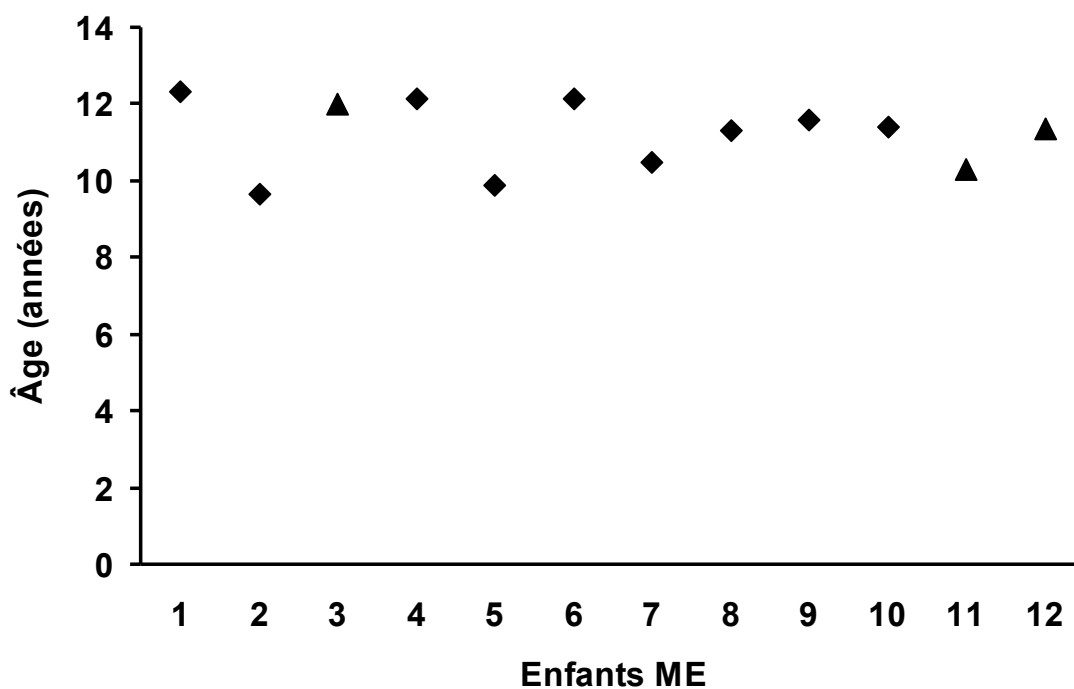


Figure 3. Âge des 12 enfants malentendants (ME) qui ont participé à l'étude. Les triangles identifient les enfants ayant éprouvé le plus de difficultés à réaliser les tâches d'organisation séquentielle auditive avec les stimuli verbaux /ba/ et /da/.

4.1.1.2. Degré de surdité

En examinant la figure 4, nous observons que le degré de surdité des trois enfants ayant plus de difficultés à réaliser le test d'OSA avec les stimuli /ba/ et /da/ n'était pas similaire. En général, ces enfants n'étaient pas ceux ayant le degré de perte auditive le plus important, ce qui ne permet pas d'associer leur faible performance au degré de surdité. Dans notre étude, certains participants malentendants (ME 8, ME 9 et ME 10) ont réalisé des performances semblables à celles d'enfants normo-entendants (voir Figures 1 et 2) et ils présentaient une surdité importante. À la lumière de ces résultats, le degré de perte auditive ne serait pas un facteur déterminant dans la

performance des enfants de la présente étude lorsqu'ils sont soumis à cette tâche d'OSA.

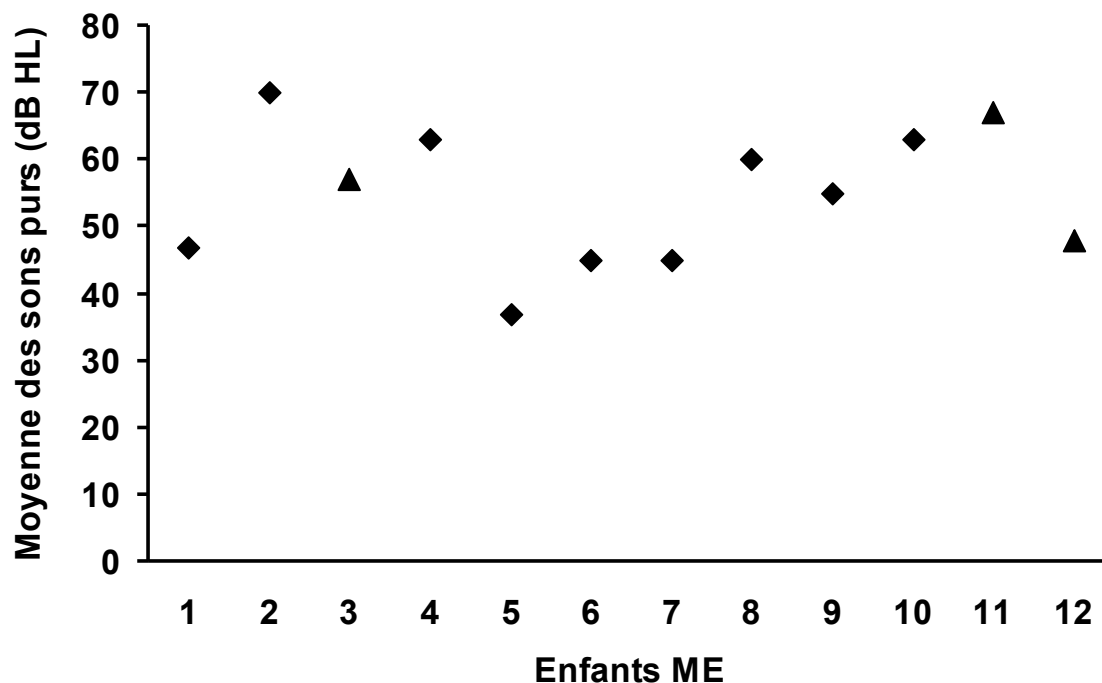


Figure 4. Moyenne des sons purs mesurée à 500, 1000 et 2000 Hz à l'oreille droite. Les valeurs sont illustrées pour les 12 enfants malentendants (ME). Les triangles identifient les enfants ayant éprouvé le plus de difficultés à réaliser les tâches d'organisation séquentielle auditive avec les stimuli verbaux /ba/ et /da/.

4.1.1.3. Durée d'utilisation de l'appareillage auditif

La surdité des enfants ME 3 et ME 12 a été détectée tardivement. Par conséquent, ils ont utilisé l'appareillage auditif sur une moins longue période que les autres enfants (voir Figures 5 et 6). Les bienfaits d'une intervention précoce auprès des enfants malentendants ont été documentés, dans la littérature, en utilisant des mesures neurophysiologiques (Sharma et al., 2002a,b, 2005). En effet, le développement du système auditif central se ferait plus efficacement chez les enfants sourds ayant reçu un

implant cochléaire en bas âge, comparativement à ceux chez qui l'implant a été installé plus tardivement (Sharma et al., 2002a,b, 2005). La détection tardive de la surdité et la courte durée de l'expérience du port de l'appareil auditif pourrait donc expliquer, en partie, la faible performance de ces deux enfants. Cependant, la surdité des enfants ME 1 et ME 5 a aussi été détectée tardivement, et ceux-ci ont malgré tout réalisé de bonnes performances. De plus, l'enfant ME 11 portait ses appareils auditifs depuis plusieurs années (environ huit ans) et il a obtenu de faibles performances aux tâches d'OSA.

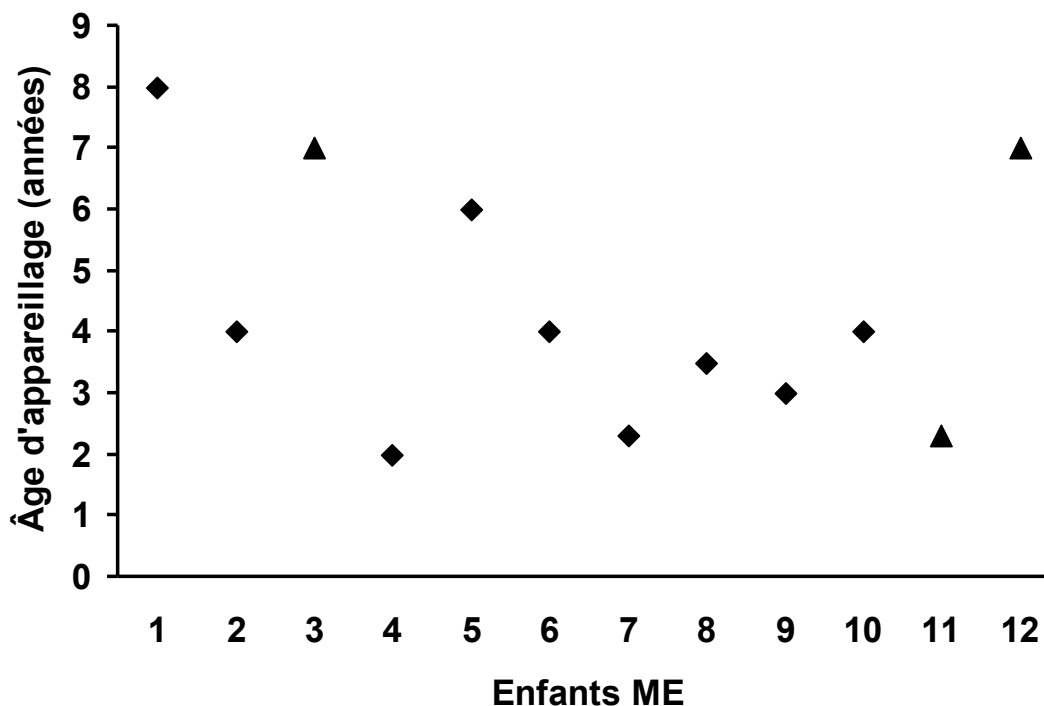


Figure 5. Âge auquel les 12 enfants malentendants (ME) ont commencé à porter des appareils auditifs. Les triangles identifient les enfants ayant éprouvé le plus de difficultés à réaliser les tâches d'organisation séquentielle auditive avec les stimuli verbaux /ba/ et /da/.

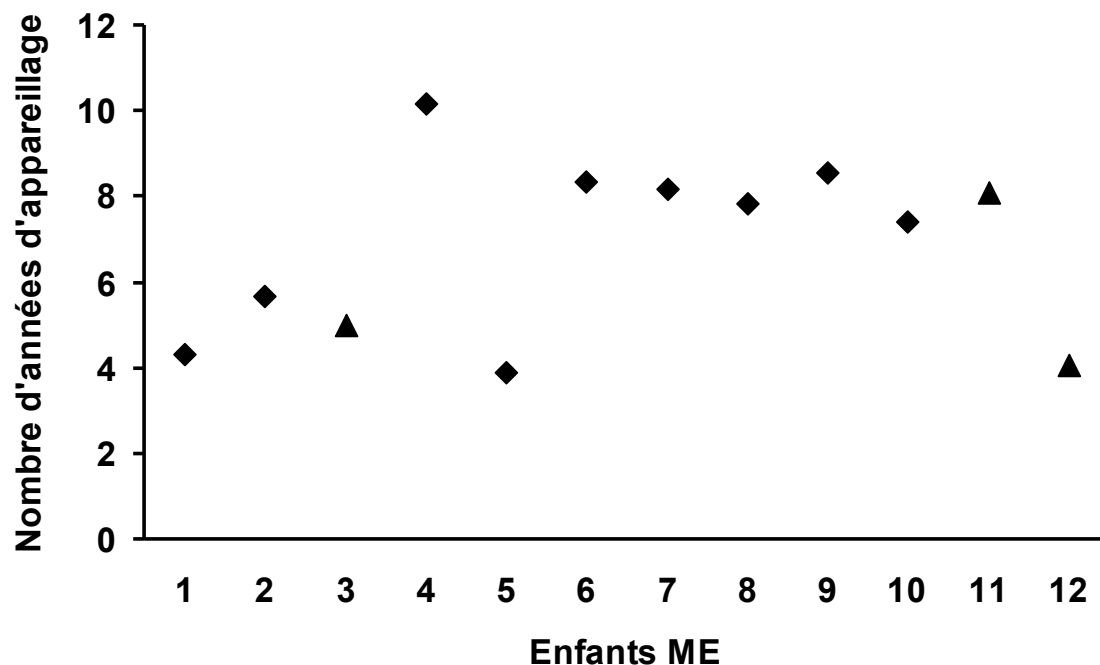


Figure 6. Nombre d'années pendant lesquelles les 12 enfants malentendants (ME) ont porté leurs appareils auditifs. Les triangles identifient les enfants ayant éprouvé le plus de difficultés à réaliser les tâches d'organisation séquentielle auditive avec les stimuli verbaux /ba/ et /da/.

Nous en concluons que la très faible performance des trois enfants malentendants ne semble pas être associée uniquement aux facteurs susmentionnés. Ces enfants n'étaient pas parmi les plus jeunes ni parmi ceux dont le degré de surdité était le plus important. De plus, les trois enfants malentendants ne portaient pas leurs appareils auditifs depuis un nombre similaire d'années.

4.1.2. Mesures électrophysiologiques

Les résultats obtenus aux mesures des potentiels évoqués auditifs de latence longue ont montré que l'amplitude de l'onde tardive N2 était réduite chez le groupe d'enfants malentendants comparativement à celle de l'onde N2 mesurée chez les enfants normo-entendants pour les trois stimuli fréquents. Cette réduction d'amplitude a également été observée avec le stimulus rare de 2 kHz. La différence entre les résultats des deux types de stimuli – fréquent versus rare – pourrait s'expliquer en partie par le facteur d'enregistrement. Comme mentionné dans l'article 2, les réponses neurophysiologiques provenant des tracés associés aux stimuli fréquents avaient une meilleure morphologie que celles venant des tracés des stimuli rares. Ceci n'est pas étonnant puisque le nombre d'essais enregistré avec les stimuli fréquents était autour de 850, tandis que celui obtenu avec les stimuli rares était de 150. Plus le nombre d'essais est grand, meilleur est le rapport entre le signal et le bruit, ce qui donne des ondes plus clairement définies. De plus, les résultats ont révélé des différences interindividuelles plus importantes avec les stimuli rares qu'avec les stimuli fréquents, et ce davantage pour le stimulus non verbal /da/ et verbal /da/ par rapport aux sons purs. L'amplitude réduite de N2 avec les deux stimuli rares (non verbal /da/ et verbal /da/) de même que la variabilité interindividuelle importante pourraient empêcher de dégager des différences statistiques entre les groupes.

Les résultats des mesures électrophysiologiques suggèrent qu'une perte auditive sensorielle pourrait moduler davantage l'amplitude que la latence des ondes électrophysiologiques. Sachant que l'amplitude d'une onde représente l'ampleur du

traitement réalisé par le système auditif central (Hillyard & Picton, 1987; Näätänen & Picton, 1987; Luck, 2005), une réduction de l'amplitude de l'onde N2 suggère que les mécanismes nécessaires au traitement des informations auditives fonctionnent différemment chez les enfants malentendants que chez les enfants normo-entendants. Par contre, la comparaison entre les données des enfants malentendants et celles des enfants ayant un TTA suggère que la capacité de discrimination automatique fonctionne plus efficacement chez les enfants malentendants que chez les enfants ayant un TTA. Ceci a été démontré par l'amplitude de l'onde ND selon la tendance des analyses statistiques. Elle était plus grande chez les enfants malentendants que chez les enfants ayant un TTA.

Par ailleurs, en examinant la tendance de la latence de l'onde N2 sur les tracés rares, nous pourrions avancer que, sur le plan neurophysiologique, les enfants malentendants traitent l'information plus lentement que les enfants normo-entendants, mais plus rapidement que les enfants ayant un TTA. En effet, les enfants malentendants avaient une latence se situant entre celle des enfants normo-entendants et celle des enfants ayant un TTA, avec les trois stimuli (Figure 7). Ces résultats vont dans le même sens que les résultats comportementaux, renforçant de nouveau l'idée que les processus impliqués dans le traitement de stimuli acoustiques fonctionnent différemment chez les enfants malentendants que chez ceux ayant un TTA.

Nous avons examiné plus en détails les données individuelles reliées à l'amplitude de l'onde N2 avec les trois stimuli fréquents. Il existe une variabilité dans les réponses neurophysiologiques des enfants des trois groupes autant pour les stimuli

verbaux que pour les non verbaux. Dans le but d'identifier les enfants malentendants ayant des résultats « anormaux », nous avons transformé les données de chaque enfant malentendant en score Z, tel qu'effectué pour le test d'OSA.

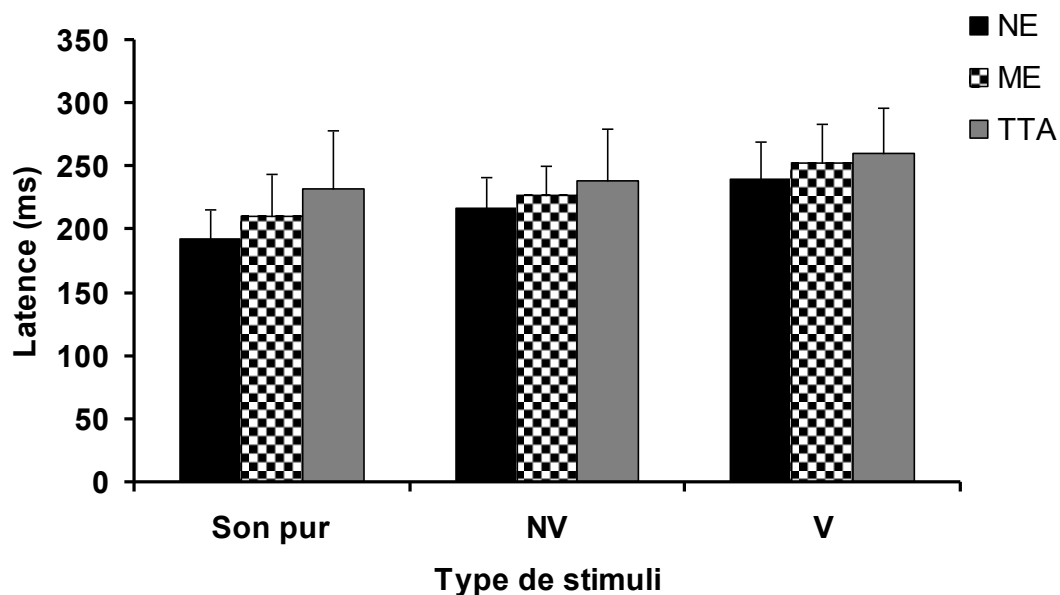


Figure 7. Moyenne et écart-type de la latence de l'onde N2 obtenue auprès d'enfants normo-entendants (NE), malentendants (ME) et ayant un trouble de traitement auditif (TTA), en utilisant le son pur de 2 kHz (Son pur), la transformation acoustique de /da/ (NV) et la syllabe /da/ (V).

Les résultats illustrés dans les figures 8, 9 et 10 indiquent que l'amplitude de l'onde N2 de certains enfants malentendants (entre deux et quatre enfants) est plus réduite que celle des autres enfants du même groupe. Le nombre d'enfants se trouvant en dessous ou à deux écarts-types change selon le type de stimulus. Par exemple, les enfants ME 8 et ME 9 ont des résultats « anormaux » avec le son pur, tandis que les enfants ME 4 et ME 9 se trouvent en dessous de deux écarts-types avec le stimulus non verbal. Avec le stimulus verbal, quatre enfants malentendants ont obtenu des résultats « anormaux »:

ME 4, ME 8, ME 9 et ME 10. En somme, les résultats des trois enfants malentendants ME 4, ME 8, ME 9 se trouvent plus souvent en dessous de deux écarts-types de la moyenne que les autres enfants de leur groupe (Figures 8, 9 et 10).

Dans les prochaines sections, nous présenterons les différents facteurs ayant pu influencer les résultats de ces trois enfants malentendants. Nous discuterons, entre autres, de l'âge lors de l'enregistrement électrophysiologique, du degré de surdité et de l'âge de l'appareillage auditif.

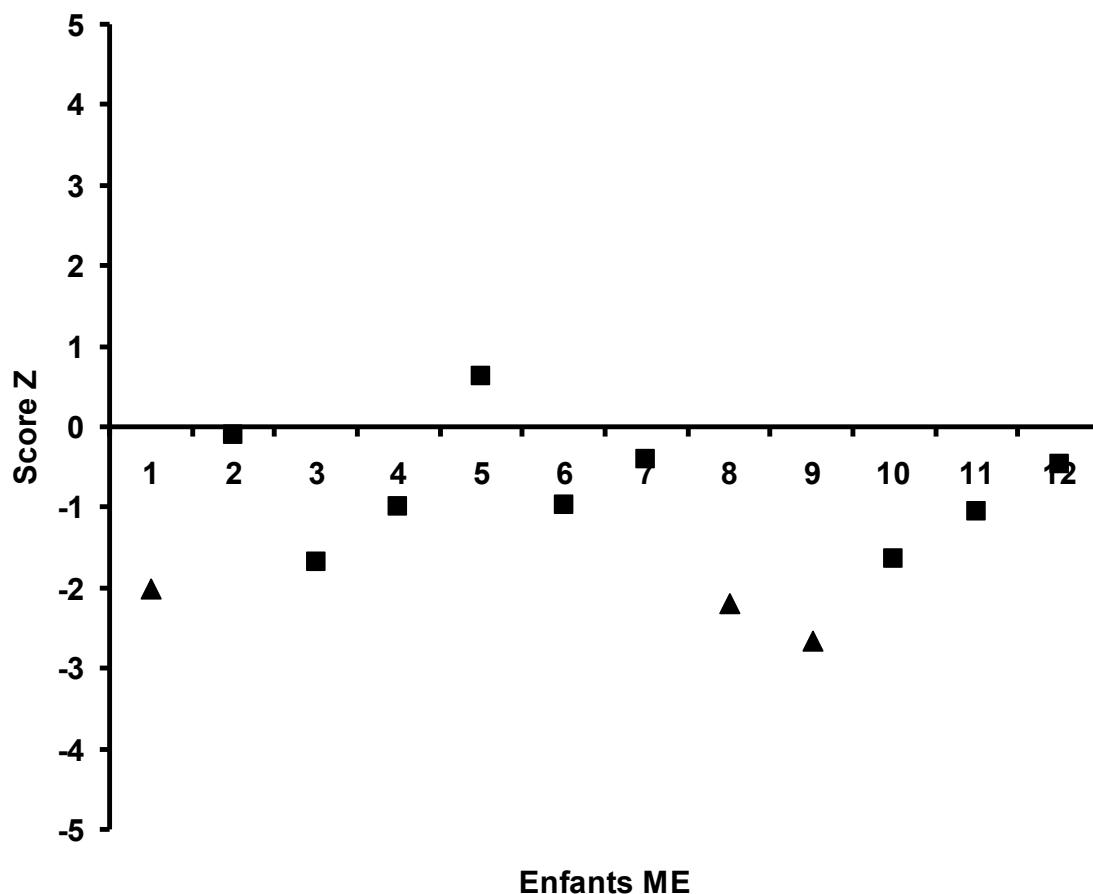


Figure 8. Score Z des 12 enfants malentendants (ME) établi à partir des résultats des 16 participants normo-entendants (amplitude de l'onde N2 avec le son pur de 1 kHz). Les trois enfants malentendants se trouvant en dessous de deux écarts-types ou à deux écarts-types de la moyenne sont identifiés par un triangle.

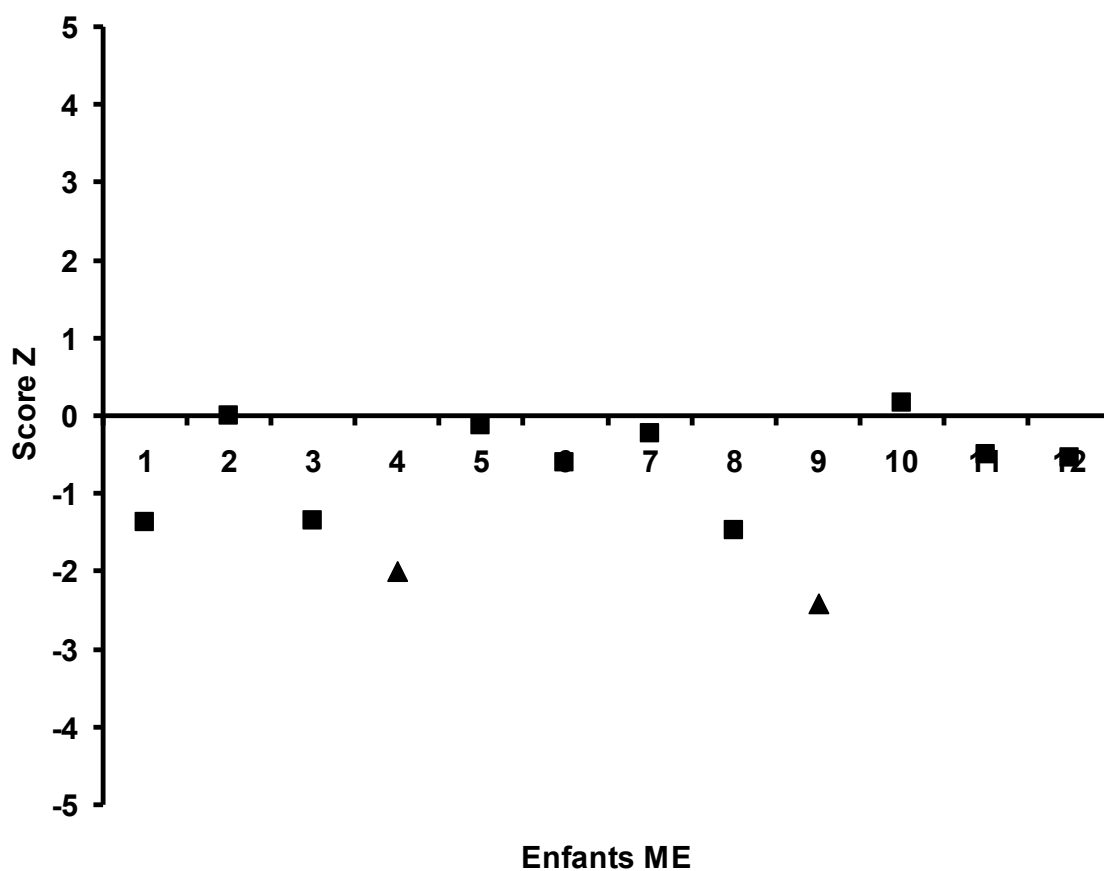


Figure 9. Score Z des 12 enfants malentendants (ME) établi à partir des résultats des 16 participants normo-entendants (amplitude de l'onde N2 avec le stimulus non verbal /ba/). Les deux enfants malentendants se trouvant en dessous de deux écarts-types ou à deux écarts-types de la moyenne sont identifiés par un triangle.

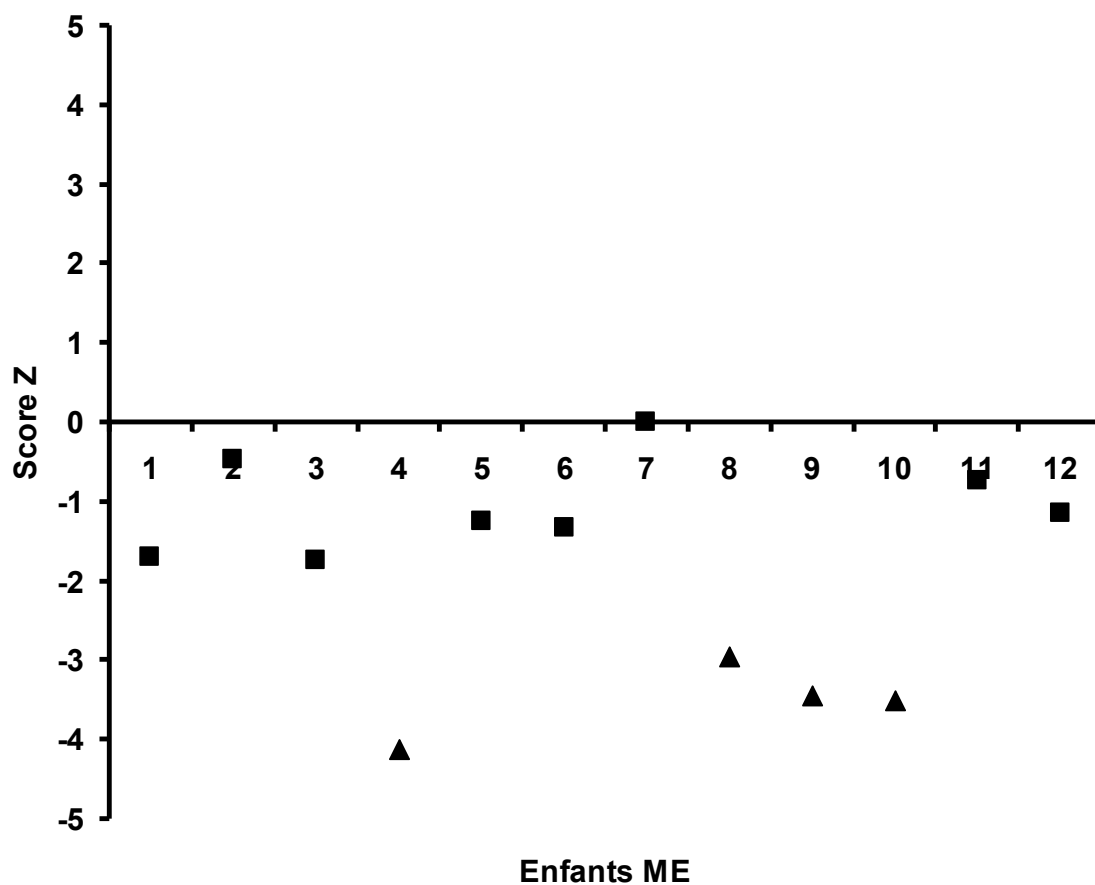


Figure 10. Score Z des 12 enfants malentendants (ME) établi à partir des résultats des 16 participants normo-entendants (amplitude de l'onde N2 avec le stimulus verbal /ba/). Les quatre enfants malentendants se trouvant en dessous de deux écarts-types ou à deux écarts-types de la moyenne sont identifiés par un triangle.

4.1.2.1. Âge lors de l'enregistrement électrophysiologique

Nous avons examiné le facteur âge afin de vérifier s'il avait eu une influence sur l'amplitude de l'onde N2. L'âge pourrait influencer les données puisque les trois enfants malentendants comptent parmi ceux qui étaient les plus âgés lors de l'enregistrement des mesures électrophysiologiques (voir Figure 11). Comme mentionné précédemment, le système auditif central subit des changements importants attribuables à la neuromaturation qui modifie les caractéristiques – amplitude et latence – des ondes corticales (Ponton et al., 2000, Sussman et al., 2008, Wunderlich et al., 2006). Les résultats de plusieurs études ont montré une diminution de la latence et de l'amplitude de l'onde P1 (Ponton et al., 2000; Sharma et al. 1997.; Sussman et al., 2008; Wunderlich et al., 2006) et de l'onde N2 (Ponton et al., 2000; Sussman et al., 2008; Wunderlich et al., 2006) ainsi que l'apparition ou l'augmentation de l'amplitude des ondes N1 et P2 en fonction de l'âge (Ponton et al., 2000; Sussman et al., 2008). De façon séquentielle, les deux ondes P1 et N2 apparaissent en premier chez les jeunes enfants. Par la suite, les ondes N1 et P2 se forment et leur morphologie se définit graduellement jusqu'à ce qu'elles acquièrent leurs caractéristiques distinctives. Dans la présente étude, nous avons trouvé, en partie, des patrons similaires à ceux rapportés dans la littérature. En effet, la latence de l'onde P1 était plus courte et l'amplitude de l'onde N2 était plus réduite chez les enfants plus âgés des trois groupes comparativement aux mesures effectuées auprès des plus jeunes. Par contre, aucun changement relié à l'amplitude de P1 et à la latence de N2 n'a été identifié en fonction de l'âge des participants. Cela s'explique probablement par la variabilité

interindividuelle des données, la taille relativement réduite de l'échantillon et l'étendue limitée de l'âge des enfants, se situant entre 9 et 12 ans, (voir Résultats complémentaires, section 3.4.1.2.1. et 3.4.1.2.2.). Quant aux ondes N1 et P2, elles étaient le plus souvent absentes chez les enfants les plus jeunes (moyenne de 9 ans et 6 mois) et présentes chez les plus âgés (moyenne de 11 ans et 5 mois) (voir Figure 12, Tableau I dans la section des résultats complémentaires et Tableaux I, II et III1 dans l'Annexe C).

Tel que mentionné plus haut, l'effet de maturation du système auditif central pourrait expliquer, en partie, la réduction d'amplitude de N2 chez les trois enfants malentendants ME 4, ME 8 et ME 9. Cependant, en examinant les résultats d'enfants malentendants du même âge, ME 6 et ME 12 (voir Figure 11), la réduction d'amplitude de N2 ne peut pas être uniquement reliée à l'effet de la neuromaturation. Si l'âge des enfants avait influencé l'amplitude de N2, on aurait dû observer ce patron chez les enfants ME 6 et ME 12. Ces deux enfants avaient des résultats semblables à ceux de leurs pairs normo-entendants pour l'amplitude de N2 avec les trois stimuli. Il est donc difficile d'établir un lien direct entre la réduction de l'amplitude de l'onde N2 et l'âge des enfants malentendants.

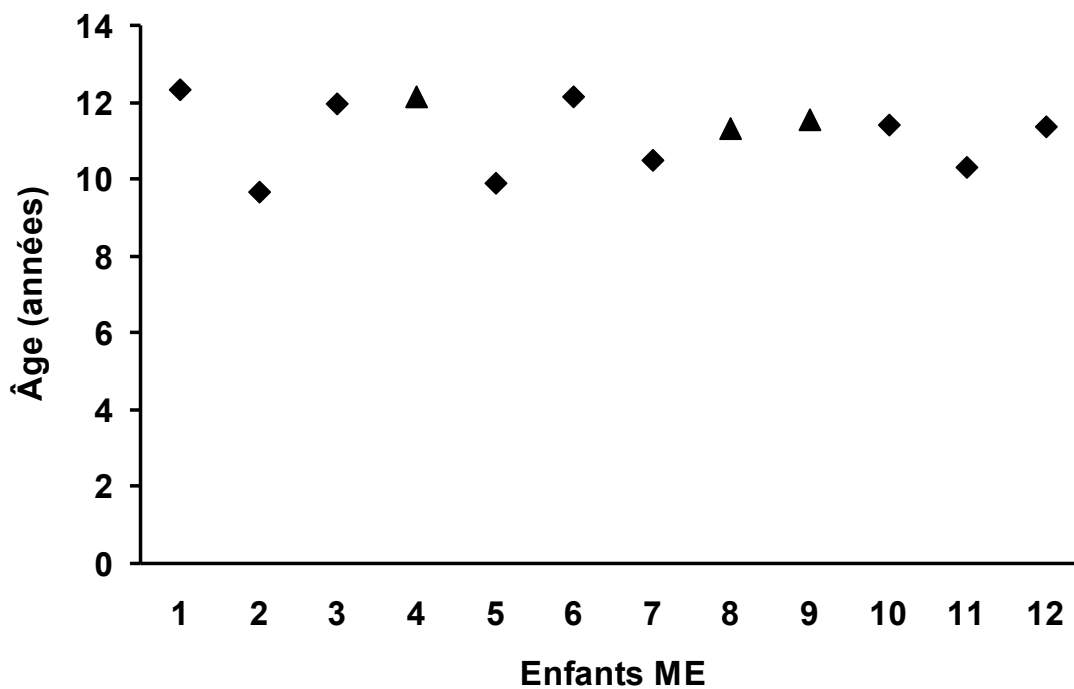


Figure 11. Âge auquel les 12 enfants malentendants (ME) ont participé à l'étude. Les triangles identifient les enfants malentendants se trouvant en dessous de deux écarts-types ou à deux écarts-types de la moyenne pour l'amplitude de l'onde N2.

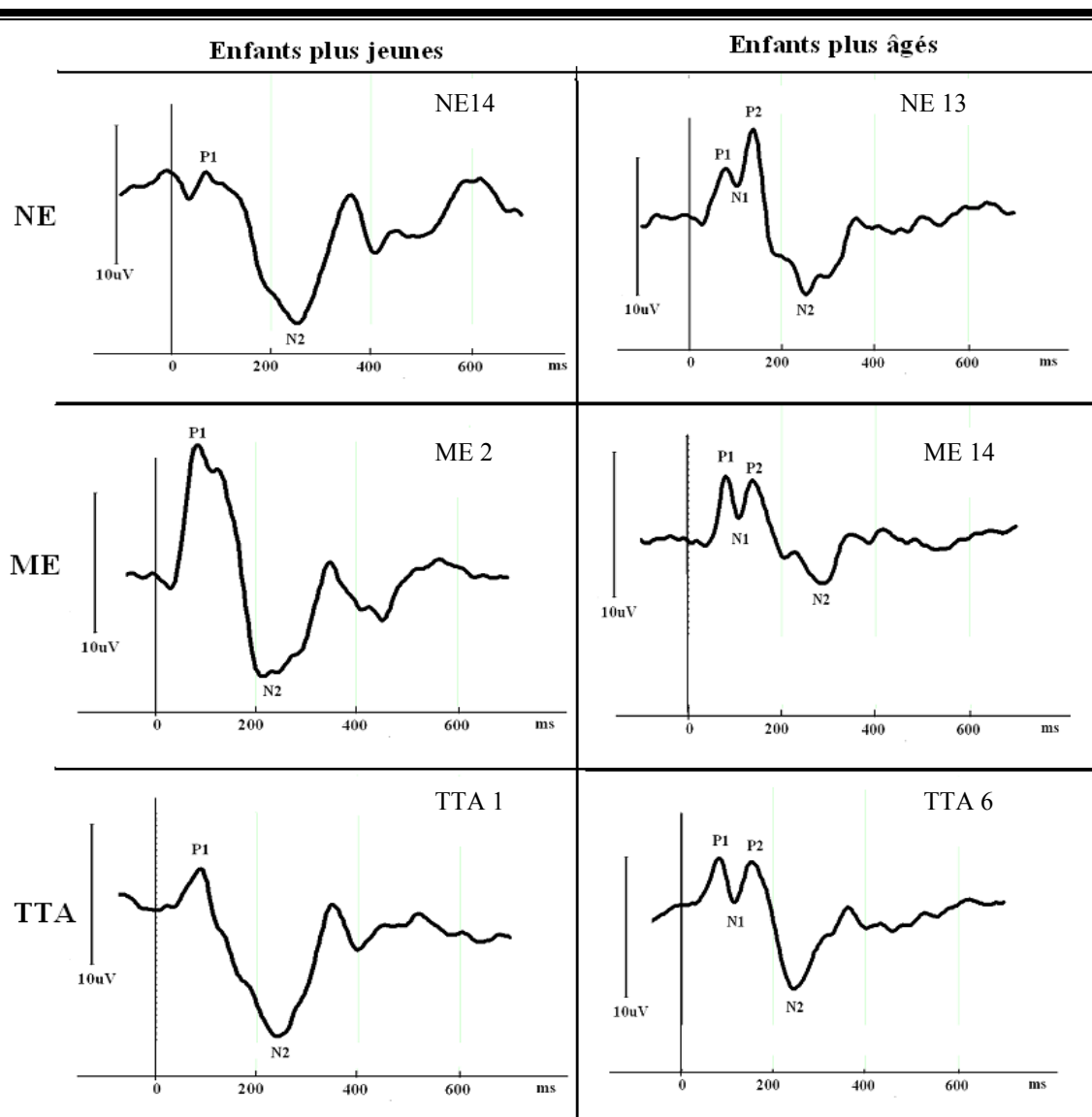


Figure 12. Tracés électrophysiologiques enregistrés avec le son pur de 1 kHz auprès d'un enfant jeune ou vieux appartenant au groupe normo-entendants (NE), malentendants (ME) ou ayant un trouble de traitement auditif (TTA), ce qui représente au total les tracés de six enfants. La colonne de gauche illustre les données des enfants plus jeunes (NE 14= 9 ans et 3 mois, ME 2 = 9 ans et 8 mois, TTA 1 = 9 ans et 9 mois) et la colonne de droite représente les données des enfants plus âgés (NE13 = 11 ans et 6 mois, ME 8 = 11 ans et 5 mois, TTA 6 = 11 ans et 5 mois).

4.1.2.2. Degré de surdité

Les résultats de l'étude d'Oates et al. (2002) menée auprès d'adultes malentendants (plus de détails dans l'introduction du chapitre 3) ont montré que la latence des ondes N1 et N2 s'allongeait et leur amplitude diminuait en fonction du degré de sévérité de la surdité des participants. De plus, Rance et al. (2002) ont rapporté que la latence des ondes P1 et N1 était plus longue chez les enfants ayant une surdité plus importante. Ces derniers n'ont cependant pas étudié les caractéristiques de l'onde N2. Si le degré de surdité joue un rôle sur l'amplitude de l'onde N2, on devrait s'attendre à ce que l'amplitude de cette onde soit réduite chez les enfants dont la perte auditive est plus sévère que chez ceux ayant une perte auditive moins sévère. Le degré de surdité des enfants ME 4, ME 8 et ME 9 va de modéré à modérément sévère (voir Figure 13). Toutefois, il semble que ce facteur ne puisse pas expliquer à lui seul la réduction de l'amplitude de l'onde N2. En effet, la valeur d'amplitude d'autres enfants ayant une surdité modérément sévère, ME 2, ME 3 et ME 11, se trouvait proche des valeurs de celle d'enfants normo-entendants (voir Figures 8, 9 et 10). Cette observation laisse croire que le degré de perte auditive ne serait pas un facteur déterminant sur la réduction de l'amplitude de l'onde N2. L'amplitude la plus faible ne s'observe pas uniquement chez les enfants de la présente étude dont le degré de surdité est le plus important.

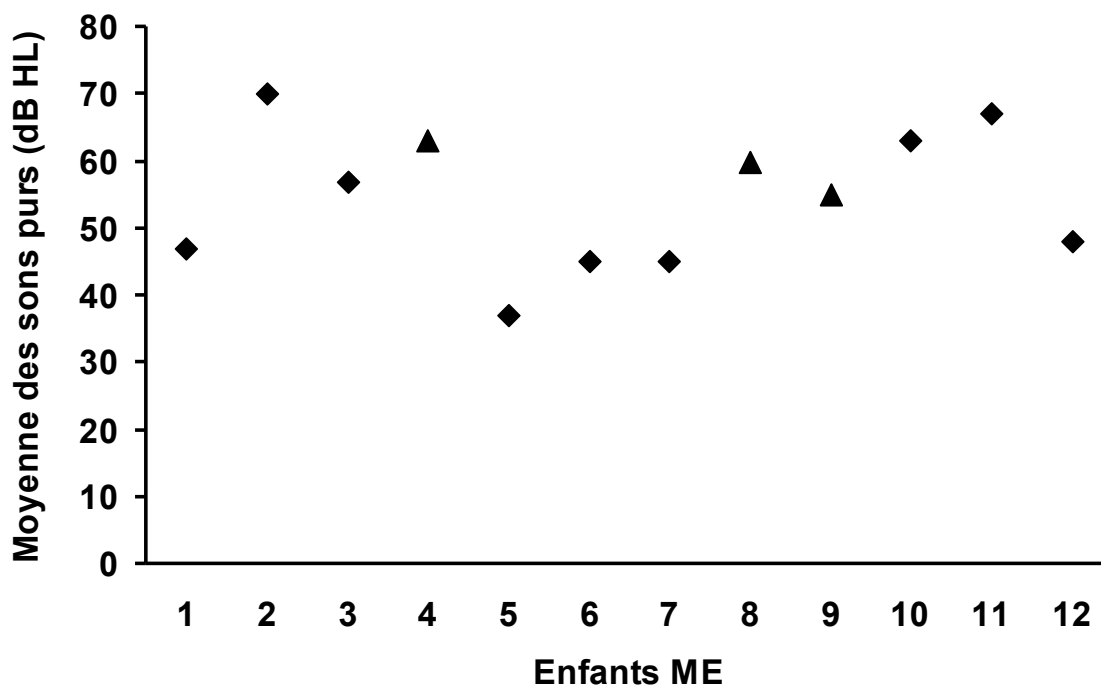


Figure 13. Moyenne des sons purs mesurée à 500, 1000 et 2000 Hz à l'oreille droite. Les valeurs sont illustrées pour les 12 enfants malentendants (ME). Les triangles identifient les enfants malentendants se trouvant en dessous de deux écarts-types ou à deux écarts-types de la moyenne pour l'amplitude de l'onde N2.

4.1.2.3. Âge de l'appareillage

Nous avons étudié la relation pouvant exister entre la réduction de l'amplitude de l'onde N2 et l'âge auquel les enfants malentendants ont commencé à porter leurs appareils auditifs. En examinant les figures 14 et 15, les enfants ME 4, ME 8 et ME 9 ont porté de façon régulière leurs appareils auditifs au moins huit ans avant l'expérimentation, se plaçant ainsi parmi les quelques enfants ayant le plus d'années d'expérience avec l'appareillage auditif. Cela pourrait laisser croire que l'appareillage auditif aurait pu contribuer à une maturation précoce des processus sous-jacents à la

formation de l'onde N2. Cependant, cette hypothèse ne semble pas pouvoir être retenue selon trois observations des données de l'étude. Premièrement, en examinant davantage les figures 8, 9, 10, 14 et 15, l'amplitude de l'onde N2 des enfants ME 5 et ME 12 ayant porté leurs appareils auditifs sur une courte durée (environ 4 ans) est similaire à celle des enfants normo-entendants. La valeur d'amplitude de l'onde N2 de ces deux enfants ne se distingue pas de celle de l'onde N2 de leurs pairs normo-entendants malgré que leur surdité ait été détectée tardivement (vers l'âge de six ou sept ans). Deuxièmement, l'amplitude de l'onde N2 des enfants ME 7 et ME 11, ayant porté leurs appareils auditifs sur une longue période (environ huit ans), ne se différencie pas non plus de celle des enfants normo-entendants. Troisièmement, une maturation précoce dans le système auditif central aurait provoqué aussi la formation des deux ondes N1 et P2. Ces deux ondes se développent tardivement avec l'âge (Ponton et al., 2000; Sussman et al., 2008). Elles étaient absentes chez deux des trois enfants malentendants ayant une réduction de l'amplitude de l'onde N2, soit ME 4 et ME 9 (voir Tableaux I, II et III, Annexe C).

En résumé, il semble difficile d'établir un lien direct entre la réduction de l'amplitude de l'onde N2 et les trois facteurs mentionnés plus haut.

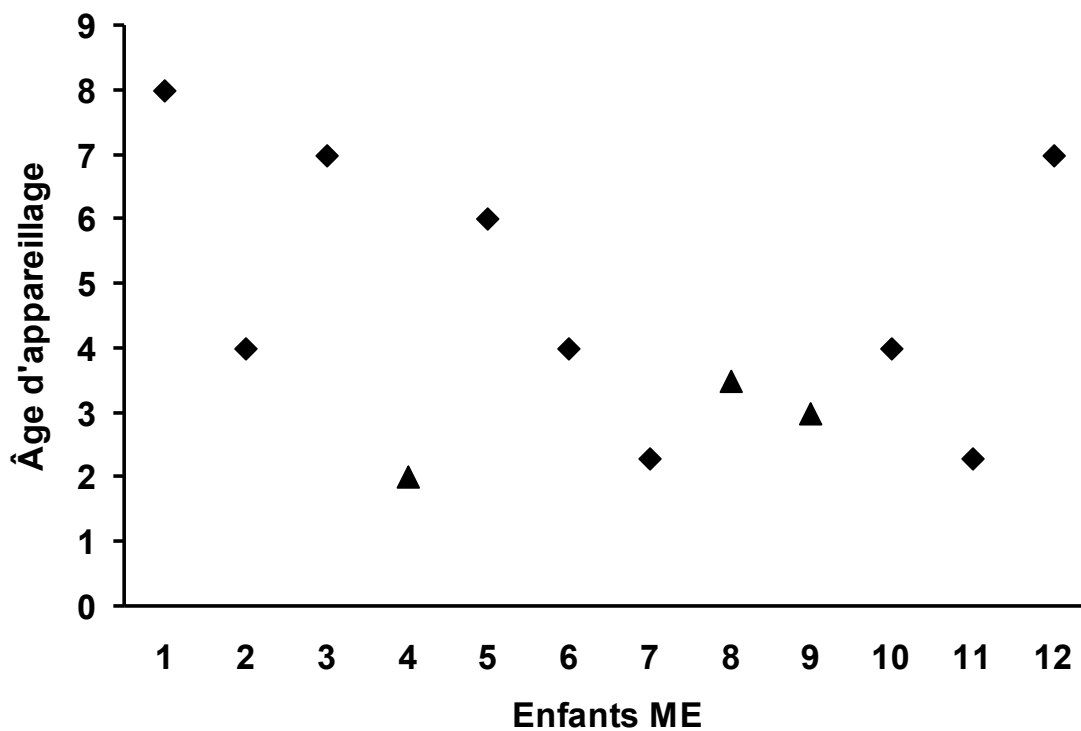


Figure 14. Âge auquel les 12 enfants malentendants (ME) ont commencé à porter des appareils auditifs. Les triangles identifient les enfants malentendants se trouvant en dessous de deux écarts-types ou à deux écarts-types de la moyenne pour l'amplitude de l'onde N2.

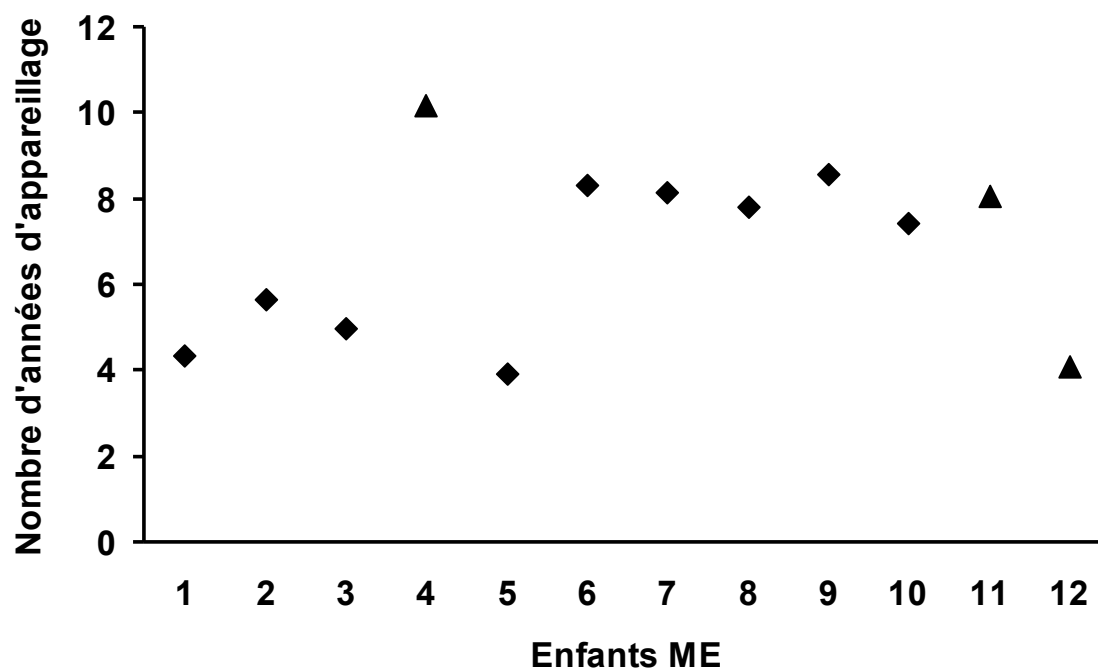


Figure 15. Nombre d'années que les 12 enfants malentendants (ME) ont porté leurs appareils auditifs. Les triangles identifient les enfants malentendants se trouvant en dessous de deux écarts-types ou à deux écarts-types de la moyenne pour l'amplitude de l'onde N2.

4.1.3. Relation entre les mesures comportementales et électrophysiologiques

Dans cette section, nous présenterons des données mettant en relation les mesures comportementales et électrophysiologiques. Toutefois, avant de les présenter, nous examinerons, dans premier temps, le rapport existant entre la tâche de discrimination auditive active lors des mesures comportementales et la tâche de discrimination auditive passive lors des mesures électrophysiologiques. Dans un deuxième temps, nous présenterons la corrélation entre, d'une part, les tâches d'OSA

avec les stimuli verbaux /ba/ et /da/ et l'amplitude de l'onde N2, et d'autre part, ces mêmes tâches et la latence de l'onde N2.

4.1.3.1. Relation entre les tâches de discrimination auditive active et passive

Nous avons comparé les résultats des enfants ayant obtenu 87 % ou plus (13 bonnes réponses ou plus sur 15) à la tâche de discrimination auditive (discrimination active) avec les résultats de l'onde de ND (discrimination passive). Nous avons utilisé les données obtenues avec les deux paires de stimuli communes aux deux mesures, soit les stimuli verbaux /ba/ et /da/ ainsi que les non verbaux /ba/ et /da/ (voir Tableau XIII dans la section 3.4.2.1. des résultats complémentaires). Les résultats n'ont pas révélé de relation directe entre les deux mesures. Par exemple, l'onde de ND était absente chez certains participants normo-entendants ayant facilement réussi la tâche de discrimination avec /ba/ et /da/. Ces patrons de résultats ont été également obtenus dans l'étude de Sharma et al., (2006) menée auprès d'enfants ayant un trouble de lecture. L'onde de ND était présente chez certains enfants ayant eu d'importantes difficultés à réaliser le test de discrimination avec les stimuli /da/ et /ga/, alors qu'elle était absente chez les enfants qui avaient réussi le même test de discrimination (Sharma et al., 2006). L'onde de ND ne serait pas toujours présente, même chez les participants normo-entendants (Kurtzberg et al., 1995; Martin et al., 1999; Sharma et al., 2006). Ces résultats suggèrent que les processus cognitifs impliqués dans les deux tâches seraient différents. Lors de l'enregistrement de l'onde de ND, la capacité de discrimination sensorielle est évaluée objectivement. Cette discrimination sensorielle serait liée aux activités neurobiologiques quand l'enfant ne porte pas attention aux stimuli entendus,

contrairement à la tâche de discrimination active. Dans cette dernière tâche, on demande à l'enfant d'écouter les stimuli et de porter un jugement sur la similarité ou la différence entre deux stimuli présentés. Le degré de motivation et le fonctionnement d'autres systèmes cognitifs, tels que la mémoire et l'attention, peuvent jouer un rôle dans l'exécution de cette tâche. Elle requiert ainsi davantage de ressources corticales que la mesure de l'onde de négativité de discordance.

4.1.3.2. Relation entre la tâche d'OSA et l'amplitude et la latence de N2

Dans le but de vérifier s'il existe une relation entre les deux outils d'expérimentation, nous avons réalisé une analyse de corrélation entre ces deux tests chez tous les enfants. De plus, compte tenu du fait que les enfants malentendants présentaient des difficultés importantes lors des tâches d'OSA avec les stimuli verbaux /ba/ et /da/, et qu'ils avaient également une amplitude réduite de l'onde N2, nous avons examiné la relation entre ces deux tests chez cette population (voir Figures 9 à 16 dans les sections 3.4.2.2., 3.4.2.2.1 et 3.4.2.2.2 des résultats complémentaires). Aucune corrélation significative n'a été trouvée entre, d'une part, les résultats de tous les enfants ainsi que ceux des enfants malentendants aux tâches d'OSA avec les stimuli verbaux et, d'autre part, la latence ou l'amplitude de l'onde N2. Les résultats d'un test ne peuvent donc pas prédire les résultats au second test. De plus, les enfants qui ont démontré des difficultés importantes lors du test d'OSA avec les stimuli verbaux et ceux ayant une amplitude réduite de l'onde N2 ne sont pas les mêmes enfants. Cette absence de corrélation significative n'est pas étonnante puisque plusieurs ressources corticales seraient impliquées pour qu'un enfant réussisse la tâche d'OSA. Lors de

l'exécution de cette tâche, l'enfant entend une séquence de deux ou plusieurs sons qui sont d'abord encodés par le système auditif périphérique. Puis, après avoir discriminé les deux sons (pareil ou différent), l'enfant doit identifier chaque phonème ou syllabe afin d'y mettre une étiquette linguistique (i.e. /ba/ ou /da/). Lors de la dernière étape, l'enfant doit répondre en appuyant sur les boutons appropriés en se rappelant rapidement l'ordre de présentation des stimuli, avant que n'arrive la deuxième série de stimuli. L'enregistrement des potentiels évoqués auditifs de latence longue, incluant l'onde N2, s'est effectué lors d'une écoute passive des stimuli, ce qui impliquerait moins de processus corticaux. Les résultats de la présente étude n'ont pas mis en évidence de relation entre ces deux tâches.

4.1.3.3. Résultats congruents provenant des deux études

Bien qu'aucun lien direct n'ait été trouvé entre les résultats obtenus aux mesures comportementales et ceux obtenus lors des mesures électrophysiologiques, il y a tout de même des résultats convergents. D'une part, les résultats de l'étude comportementale démontrent que les enfants malentendants ont davantage de difficulté que leur pairs entendants à exécuter la tâche d'OSA avec les stimuli verbaux /ba/ et /da/. D'autre part, l'analyse complémentaire a démontré une latéralisation des réponses neurophysiologiques chez les enfants malentendants pour la latence de l'onde N2 avec les mêmes stimuli. En effet, la latence de cette onde était plus longue chez les enfants malentendants que chez les enfants normo-entendants avec le stimulus verbal à l'hémisphère gauche (électrode C3). De plus, les résultats de la topographie ont démontré une légère latéralisation vers l'hémisphère droit avec les stimuli verbaux chez

les participants malentendants. Ces résultats suggèrent une réduction de l'activité corticale à l'hémisphère gauche chez les enfants malentendants lorsqu'ils entendaient les stimuli verbaux /ba/ et /da/. L'allongement de la latence de N2 et la réduction d'activité corticale avec les stimuli verbaux ont été observés à l'hémisphère gauche qui est responsable du traitement du langage (Raja-Beharelle et al., 2010). Les trois résultats abondent dans le même sens, c'est à dire qu'un certain nombre d'enfants malentendants ont un trouble spécifique de traitement auditif.

4.2. Avenues de recherche

Les résultats des deux études de la présente thèse ont des retombées potentielles en clinique. Cependant, avant que cette méthode d'évaluation ne soit applicable dans les milieux cliniques, certaines étapes préalables et certaines vérifications doivent être considérées. Tout d'abord, il faudrait augmenter la taille de l'échantillon d'enfants malentendants et élargir la distribution des âges représentés dans cet échantillon. Ces deux aspects rendraient possibles le développement de normes et la validation de nos résultats en lien avec les deux outils d'expérimentation de la présente thèse. En effet, le facteur de l'âge influence de façon déterminante les résultats des mesures d'OSA (Jutras & Gagné, 1999) et des mesures d'électrophysiologie (Ponton et al., 2000; Sussman et al., 2008). Une étude subséquente pourrait explorer cet aspect en soumettant aux deux types de mesure les enfants malentendants de six à seize ans, en les divisant en cinq groupes, soit les six à huit ans, les huit à dix ans, les dix à douze ans, les douze à quatorze ans, et les quatorze à seize ans. Cela permettrait ainsi d'obtenir des résultats plus différenciés en fonction de l'âge et d'identifier les enfants

malentendants étant les plus à risque de développer un trouble de traitement auditif plus global que celui mis en évidence dans la présente recherche.

Nous devrions également prendre en considération le degré de surdité de l'enfant lors du développement des normes. En effet, selon les données de la présente thèse, une surdité modérée à modérément sévère ne semble pas influencer les résultats. Cependant, il serait important de vérifier l'influence qu'une surdité légère versus une surdité sévère pourrait avoir sur les résultats d'enfants malentendants.

De plus, étant donné que la mesure électrophysiologique est un outil objectif qui ne nécessite pas la participation active de l'enfant, nous pourrions éventuellement appliquer cette mesure chez les bébés et les très jeunes enfants. Les résultats de la présente thèse ont démontré que l'onde N2 pourrait constituer un marqueur neurophysiologique pour identifier un trouble de traitement auditif chez les enfants malentendants. Si les résultats obtenus auprès des enfants de 9 à 12 ans se vérifient aussi chez les enfants malentendants plus jeunes, il en découlerait alors des retombées importantes sur le plan clinique.

4.3. Implications cliniques

Comme il a été mentionné dans l'introduction de cette thèse, les tests cliniques disponibles évaluant le système auditif central requièrent généralement que le système auditif périphérique soit intact. En conséquence, l'identification d'un trouble de traitement auditif chez les enfants ayant différents degrés de surdité s'avère présentement presque impossible. Malgré cela, nous sommes d'avis que l'utilisation de

mesures comportementales et celles provenant d'enregistrement de l'activité corticale pourraient éventuellement aider les audiologistes dans un processus de diagnostic différentiel. Une retombée potentielle de la présente thèse serait l'adaptation d'un protocole évaluant le système auditif central d'enfants malentendants dans le milieu clinique en audiologie. L'audiologiste pourrait utiliser le test d'OSA avec les stimuli verbaux et non verbaux. Différents profils de réponses sont attendus. Nous proposons un continuum de profils basés sur le patron de réponses obtenues au test d'OSA (voir Tableau I) :

1) Profil normal (profil N) : on y trouve des enfants malentendants réussissant parfaitement les tâches d'OSA avec tous les stimuli. Ils n'éprouvent aucun autre trouble auditif que leur surdité.

2) Profil TTA-spécifique (profil TTA-S) : ce profil est associé aux enfants malentendants qui obtiennent des résultats anormaux uniquement avec les stimuli verbaux /ba/ et /da/. Ils présentent alors un trouble spécifique de traitement auditif, tel que rapporté dans la présente recherche.

3) Profil TTA (profil TTA) : ce profil correspond aux enfants malentendants qui éprouvent des difficultés à réaliser les tâches avec les stimuli non verbaux /ba/ et /da/ et avec les stimuli verbaux /ba/ et /da/. Cependant, ils obtiennent des résultats normaux avec /a/ et /da/. Ces enfants ont des difficultés dans le traitement rapide de l'information auditive complexe.

4) Profil TTA-non verbaux (profil TTA-NV) ou profil langage-étiquette (L-E) : on y retrouve les enfants malentendants ayant une performance normale avec les stimuli verbaux, mais présentant des difficultés importantes avec les stimuli non verbaux. Pour ce profil, il faut soumettre l'enfant à d'autres stimuli non verbaux simples, par exemple la paire comprenant un bruit de bande large et un son pur de 1 kHz utilisée dans l'étude de Jutras & Gagné (1999). Si la personne échoue la tâche d'OSA avec les stimuli simples, on pourrait la placer dans la catégorie TTA-NV. Cependant, si la personne réussit le test avec les stimuli simples et les stimuli non verbaux complexes, cette personne aurait le profil langage-étiquette. Ce profil représenterait les enfants malentendants qui ont des difficultés à mettre une étiquette langagière sur les stimuli non verbaux complexes.

5) Profil langage (profil L) : ce profil regroupe les enfants ayant une performance normale avec les stimuli non verbaux, mais anormale avec tous les stimuli verbaux. Ces enfants malentendants auraient probablement un trouble ou un retard de langage.

6) Profil cognitif (profil C) : ce profil est associé aux enfants qui ont de pauvres performances avec tous les stimuli. Ce profil correspond aux enfants malentendants ayant des troubles autres qu'auditifs tels que, par exemple, un trouble d'attention.

Tableau I. Six profils proposés en se basant sur les résultats normaux (N) ou anormaux (AN) du test d'organisation séquentielle auditive avec les stimuli verbaux /ba/-/da/, /a/-/da/ et non verbaux (transformation acoustique de /ba/ et /da/ - NV). Les six profils sont : normal (N), trouble de traitement auditif spécifique (TTA-S), trouble de traitement auditif (TTA), trouble de traitement auditif spécifique aux stimuli non verbaux (TTA-NV), problème de langage pour mettre une étiquette (L-É), retard ou trouble du langage (L-V) et trouble cognitif (C).

| | | Nature des incapacités reliées à la tâche d'OSA | | | | | |
|---------------|----------|---|------------|---------------|------------|----------|-----------|
| | | Auditive | | | Langagière | | Cognitive |
| /a/-/da/ | N | N | N | N | N | AN | AN |
| /ba/-/da/ | N | AN | AN | N | N | AN | AN |
| NV | N | N | AN | AN | AN | N | AN |
| Profil | N | TTA-S | TTA | TTA-NV | L-É | L | C |

Bien que nous n'ayons pas observé tous les profils proposés, en raison de la taille relativement réduite de notre échantillon ou des critères d'exclusion, nous avons pu classer dans un profil respectif les trois enfants – ME 3, ME 11 et ME 12 – ayant eu le plus de difficultés avec les stimuli /ba/ et /da/ (voir Figures 1 et 2 dans la section 4.1.1.). En effet, nous avons examiné la performance des enfants malentendants avec les stimuli verbaux /a/ et /da/ (Figures 16 et 18) et non verbaux /ba/ et /da/ (Figures 17 et 19) en plus de celle obtenue avec les stimuli verbaux /ba/ et /da/.

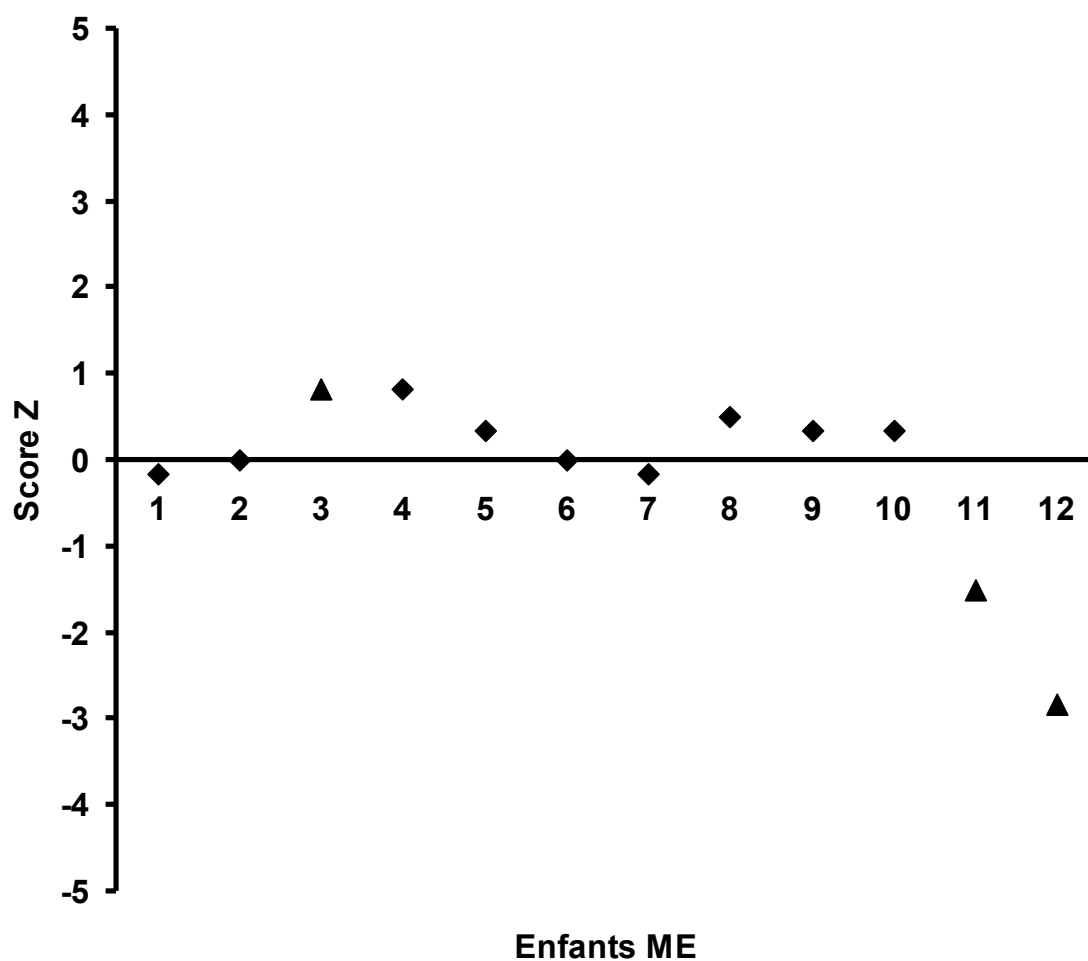


Figure 16. Score Z des 12 enfants malentendants (ME) établi à partir des résultats des 16 participants normo-entendants (moyenne de deux, trois et cinq éléments par séquence) avec les stimuli verbaux /a/ et /da/. Les trois enfants malentendants ayant eu le plus de difficultés dans la tâche d'organisation séquentielle auditive sont identifiés par un triangle (ME 3, ME 11 et ME 12).

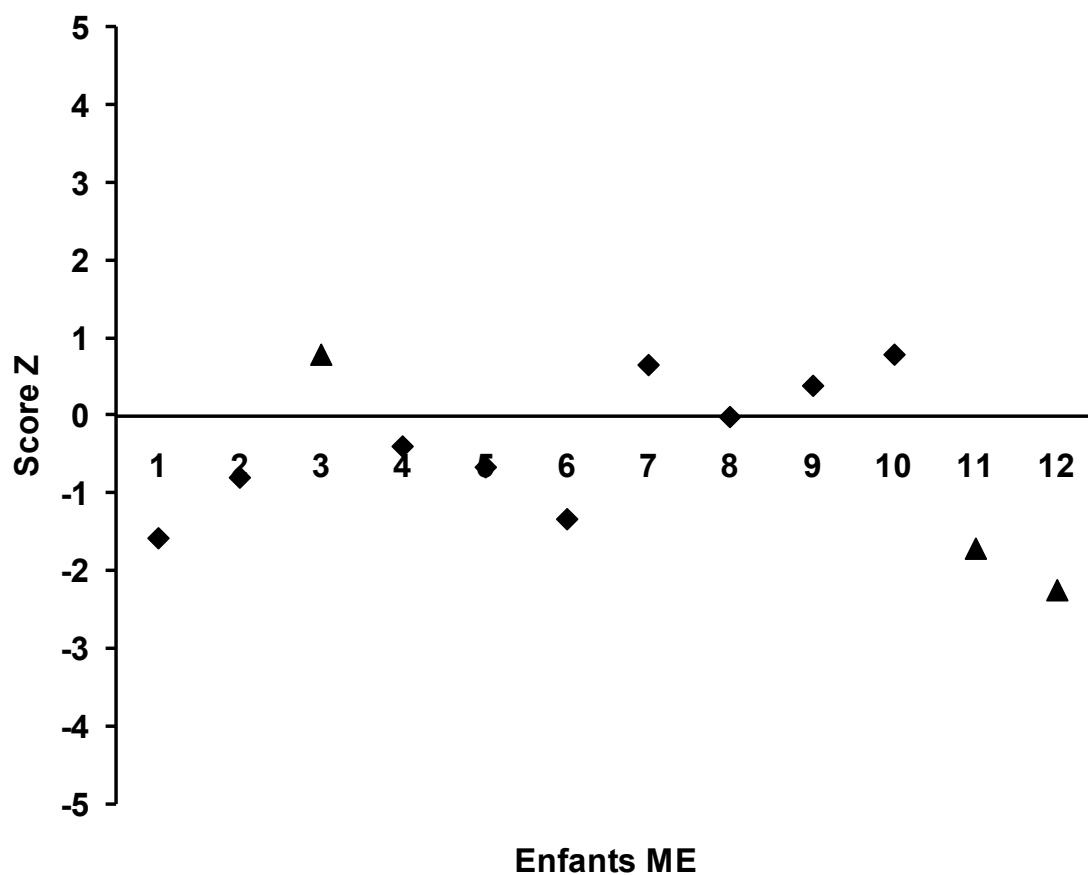


Figure 17. Score Z des 12 enfants malentendants (ME) établi à partir des résultats des 16 participants normo-entendants (moyenne de deux, trois et cinq éléments par séquence) avec les stimuli non verbaux /ba/ et /da/. Les trois enfants malentendants ayant eu le plus de difficultés dans la tâche d'organisation séquentielle auditive sont identifiés par un triangle (ME 3, ME 11 et ME 12).

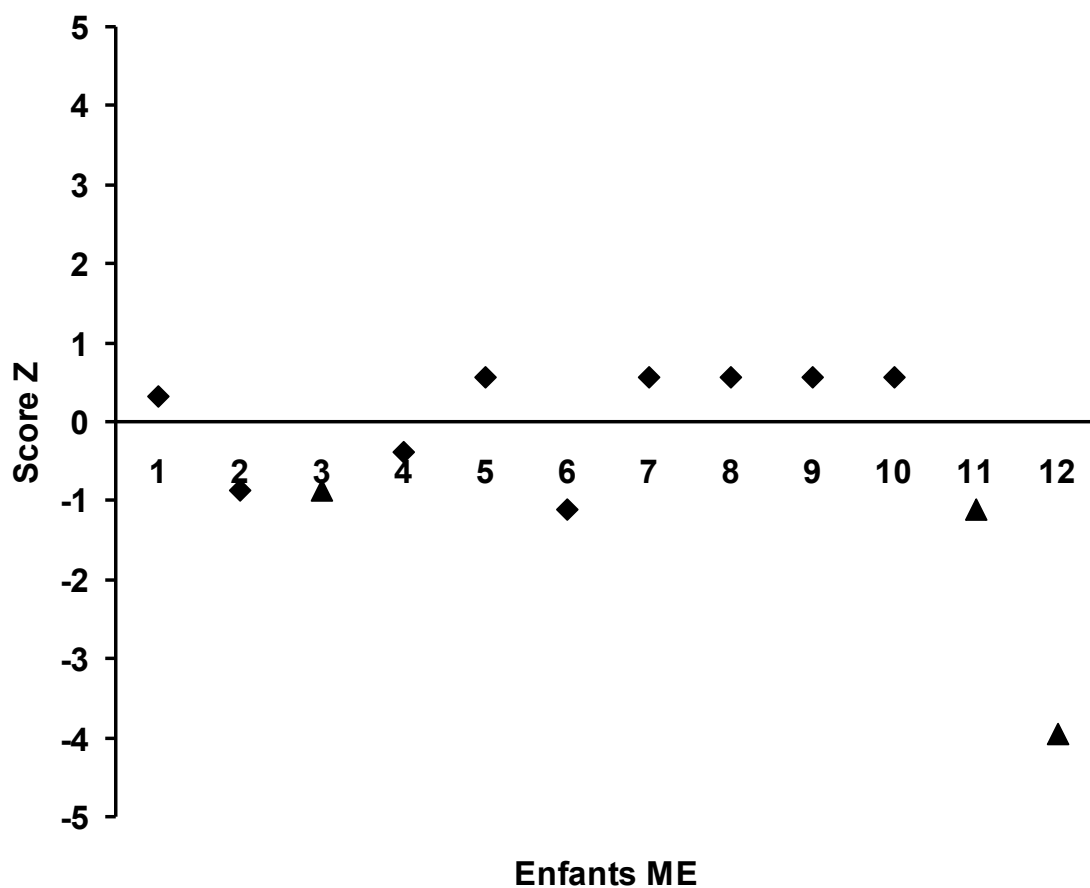


Figure 18. Score Z des 12 enfants malentendants (ME) établi à partir des résultats des 16 participants normo-entendants (moyenne de trois intervalles de 20, 425 et 1000 ms) avec les stimuli verbaux /a/ et /da/. Les trois enfants malentendants ayant eu le plus de difficultés dans la tâche d'organisation séquentielle auditive sont identifiés par un triangle (ME 3, ME 11 et ME 12).

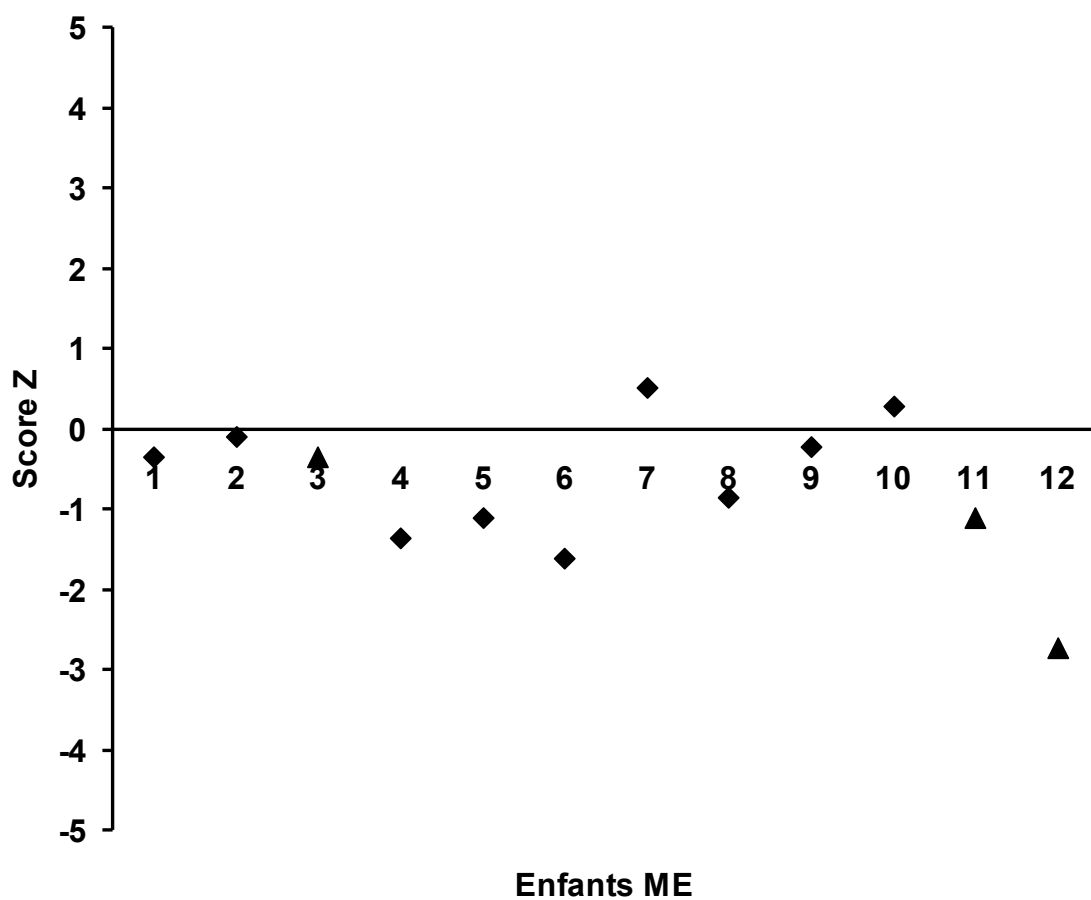


Figure 19. Score Z des 12 enfants malentendants (ME) établi à partir des résultats des 16 participants normo-entendants (moyenne de trois intervalles de 20, 425 et 1000 ms) avec les stimuli non verbaux /ba/ et /da/. Les trois enfants malentendants ayant eu le plus de difficultés d'organisation séquentielle auditive avec /ba/ et /da/ sont identifiés par un triangle (ME 3, ME 11 et ME 12).

À partir des résultats présentés dans les figures 1, 2, 16, 17, 18, et 19, nous pouvons constater que l'enfant ME 3 s'inscrit dans le profil TTA-S. Cet enfant a bien réussi les tâches d'OSA avec les stimuli verbaux /a/ et /da/ et les stimuli non verbaux, mais a éprouvé d'importantes difficultés avec les stimuli /ba/ et /da/. Les résultats obtenus par l'enfant ME 12 cadreraient davantage avec le profil C étant donné ses pauvres performances avec les trois stimuli.

En ce qui concerne l'enfant ME 11, son patron de réponses est moins évident. Des indices laissent croire qu'il a le profil TTA-S, d'autres indices semblent indiquer qu'il serait plutôt de profil C. En plus de ceux obtenus avec les stimuli /ba et /da/, ses résultats se situaient parfois à près de deux écarts-types de la moyenne. Ce patron s'observait avec les stimuli /a/ et /da/ et avec les stimuli non verbaux lorsque le nombre d'éléments changeait, mais pour la tâche d'OSA comprenant deux éléments avec un IIS variable, ses résultats se rapprochaient davantage de la moyenne des résultats des enfants normo-entendants. Il a donc des difficultés associées aussi au profil C.

Les profils présentés n'ont pas la prétention de diagnostiquer des troubles langagiers ou cognitifs. Toutefois, ils mettent en évidence des difficultés pouvant être associées à ces troubles chez certains enfants tandis que chez d'autres enfants, les difficultés sont davantage d'ordre auditif. Les profils permettraient donc aux professionnels de diriger les enfants vers des programmes d'intervention appropriés. En effet, ces outils pourraient être utilisés par les cliniciens pour intervenir de façon plus spécifique, et offrir des services de réadaptation adaptés aux difficultés identifiées à la suite de l'évaluation. Cependant, le protocole d'évaluation d'OSA devrait être modifié

afin de diminuer la période d'évaluation. Les séries contenant trois éléments ou les séries ayant un IIS de 1000 ms pourraient être éliminées. En effet, les résultats de l'étude 1 ont démontré que les enfants des trois groupes avaient des performances similaires lors des séquences comprenaient deux ou trois éléments ou lorsque l'IIS était de 425 ou 1000 ms (voir Figures 1 et 2 de l'article 1).

Quant aux implications cliniques de la mesure électrophysiologique, comme nous l'avons mentionné, l'onde N2 constituerait potentiellement un marqueur neurophysiologique prometteur pour identifier un trouble de traitement auditif chez les enfants malentendants. Si les résultats des recherches mettent en évidence que l'onde N2 permet d'identifier un trouble de traitement auditif central chez les bébés et les très jeunes enfants malentendants, les retombées cliniques pourraient être importantes. Il serait alors possible de détecter de façon précoce un trouble de traitement auditif chez ce groupe d'enfants. Nous pourrions éventuellement utiliser cet outil comme mesure de dépistage du trouble de traitement auditif. Toutefois, le protocole de cette mesure devrait également être modifié afin qu'il soit applicable dans les milieux cliniques. Il faudrait ainsi diminuer le nombre d'électrodes d'enregistrement et limiter leur application aux régions centrales. Ces changements réduiraient le temps consacré à l'installation des électrodes et à l'évaluation. De plus, nous proposons d'utiliser un stimulus verbal et un son pur puisque des différences significatives ont été obtenues entre ces deux stimuli au cours des analyses statistiques effectuées (Article 2, chapitre 3).

Le développement de normes impose une période de délai importante avant que ces mesures ne soient utilisées en clinique. Cependant, nous pouvons commencer à créer un pont entre la clinique et la recherche en formant des audiologistes intéressés à ce type de mesures.

4.4. Conclusion

Les études présentées avaient pour objectif d'apporter de nouvelles connaissances sur les habiletés auditives centrales d'enfants malentendants. Elles ont été menées auprès d'enfants de 9 à 12 ans, dont 12 étaient malentendants, 12 avaient un trouble de traitement auditif et 16 étaient normo-entendants. L'ensemble des résultats obtenus suggère que la perte auditive périphérique entraîne un trouble spécifique de traitement auditif chez les enfants. D'une part, les résultats de la tâche d'organisation séquentielle auditive suggèrent que les enfants malentendants ont un pattern de résultats unique en montrant de la difficulté à traiter seulement des séquences de stimuli verbaux acoustiquement similaires. D'autre part, les résultats obtenus aux mesures électrophysiologiques suggèrent que l'amplitude de l'onde N2 constituerait un bon marqueur neurophysiologique pour montrer des déficiences dans le traitement auditif d'enfants malentendants. Les résultats suggèrent également que l'onde de négativité de discordance serait un bon indicateur pour distinguer les enfants malentendants des enfants ayant un trouble de traitement auditif, puisque les données montrent des différences entre les deux groupes pour la valeur de l'amplitude de l'onde de négativité de discordance.

Bien que les résultats n'aient pas montré de relation directe entre les mesures comportementales et électrophysiologiques, ces dernières pourraient fournir des informations supplémentaires aux résultats obtenus à la tâche d'organisation séquentielle auditive. Par exemple, les mesures électrophysiologiques pourraient, entre autres, identifier des anomalies dans le fonctionnement du système auditif central qui

n'avaient été mises en lumière par les tâches d'organisation séquentielle auditive. Elles pourraient aussi confirmer des difficultés spécifiques au traitement de l'information auditive d'enfants malentendants, telles que démontrées dans la présente recherche.

Bibliographie

American National Standard Institute. (1996). *American national standard specifications for audiometers* (ANSI S3.6). New York: Author.

Alonso-Bu'a, B., Di'az, F. & Ferraces, M.J. (2006). The contribution of AERPs (MMN and LDN) to studying temporal vs. linguistic processing deficits in children with reading difficulties. *International Journal of Psychophysiology*, 59, 159-167.

Arnold, P. (1999). Emotional disorders in deaf children. In V. Schwean & D. Saklofske (Eds.), *Handbook of psychosocial characteristics of exceptional children* (pp. 493–521). New York, NY: Kluwer Academic/ Plenum.

Baumann, S.B., Rogers, R.L., Papanicolaou, A.C. & Saydjari, C.L. (1990). Intersession replicability of dipole parameters from free components of the auditory evoked magnetic field. *Brain Topography*, 3, 311-319.

Bess, F.H., Dodd-Murphy, J. & Parker, R.A. (1998). Children with minimal sensorineural hearing loss: Prevalence, educational performance, and functional status. *Ear & Hearing*, 19, 339-354.

Butcher, J. (1992). Cognitive auditory responses. In J. T. Jacobson (Ed.), *Principles and applications in auditory evoked potentials*, (pp. 219-235). Boston, MA: Allyn & Bacon.

Campbell, R.A. & Counter, S.A. (1969). Temporal integration and periodicity pitch. *Journal of the Acoustical Society of America*, 45, 691-693.

Ceponiene, R., Rinnea, T. & Naatanen, R. (2002). Maturation of cortical sound processing as indexed by event-related potentials. *Clinical Neurophysiology*, 113, 870-882.

Chermak, G.D. & Musiek, F.E. (1997). *Central auditory processing disorders: New perspectives*. San Diego: Singular Publishing Group, Inc.

Davis, J. M., Elfenbein, J. Schum, J. and Bentler, R. A. (1986). Effects of mild and moderate hearing impairments on language, educational, and psychosocial behavior of children. *Journal of Speech and Hearing Disorders*, 51, 53-62.

De Agostini, M. & Dellatolas, G. (1988). Une épreuve simple pour évaluer la préférence manuelle chez l'enfant à partir de 3 ans. *Enfance*, 41, 1939-1947.

Dempsey, J.J. & Maxon, A.B. (1982). Temporal integration functions in hearing impaired children. *Ear & Hearing*, 3, 271-273.

Durant, J.D & Lovrinic, J.H. (1984). *Bases of hearing science* (Second Edition). Baltimore : Williams & Wilkins.

Dr Speech. (1998). Version, 4, 20. Tiger DRS inc. Etats-unis.

Fifer, R.C., Jerger, J.F., Berlin, C.I., Tobey, E.A. & Campbell, J.C. (1983). Development of a dichotic sentence identification test for hearing-impaired adults. *Ear & Hearing*, 4, 300-305.

Frenck-Mestre, C., Besson, M. & Pynte, J. (1997). Finding the locus of semantic satiation : an electrophysiological attempt. *Brain and Language*, 57, 406-422.

Giard, M.H., Perrin, F., Pernier, J. & Bouchet, P. (1990). Brain generators implicated in the processing of auditory stimulus deviance: A topographic event-related potential study. *Psychophysiology*, 27, 627-640.

Glasberg, B.R. & Moore, B.C.J. (1989). Psychoacoustic abilities of subjects with unilateral and bilateral cochlear hearing impairments and their relationship to the abilities to understand speech. *Scandinavian Audiology, Supplement 32*, 1-25.

Glasberg, B.R., Moore, B.C.J. & Bacon, S.P. (1987). Gap detection and masking in hearing-impaired and normal-hearing subjects. *The Journal of the Acoustical Society of America*, *81*, 1546-1556.

Gomes, H., Sussman, E., Ritter, W., Kurtzberg, D., Cowan, N. & Vaughan, HG.Jr. (1999). Electrophysiological evidence of developmental changes in the duration of auditory sensory memory. *Developmental psychology*, *35*, 294-302.

Henke, W. (1993). Mitsyn Software program. Boston: Massachusetts Institute of Technology.

Hirsh, I. J. (1959). Auditory perception of temporal order. *The Journal of the Acoustical Society of America*, *31*, 759-767.

Illing, R.B, Kraus, K.S. & Meidinger, M.A. (2005). Reconnecting neuronal networks in the auditory brainstem following unilateral deafening. *Hearing Research*, *206*, 185-99.

Jirsa, R.E. & Clontz, K.B. (1990). Long latency auditory event-related potentials from children with auditory processing disorders. *Ear & Hearing*, *11*, 222-232.

Jutras, B. & Gagné, J.-P. (1996). L'organisation séquentielle de stimuli acoustiques: cadre conceptuel et implications cliniques. *Revue d'orthophonie et d'audiologie*, *20*, 197-206.

Jutras, B., & Gagné, J.-P. (1999). Auditory sequential organization among children with and without a hearing loss. *Journal of Speech, Language and Hearing Research*, *42*, 553-567.

Keith, R.W. (2000). Random gap detection test. St.Louis, MO : Auditec.

Khairi, M., Daud, M., Noor, R.M., Rahman, N.A, Sidek, D.S. & Mohamad, A. (2010). The effect of mild hearing loss on academic performance in primary school children. *International Journal of Pediatric Otorhinolaryngology*, 74 , 67-70.

Koravand, A., Jutras, B. & Roumy, N. (2010). Peripheral hearing loss and auditory temporal-ordering ability in children. *International Journal of Pediatric Otorhinolaryngology*, 74, 50-55.

Koravand, A., Jutras, B. & Lassonde, M. (submis). Cortical auditory evoked potentials in children with a hearing loss: A pilot study. *International Journal of Pediatrics*.

Kraus, N. & McGee, T.J. (1994). Auditory Event-Related Potentials. Dans J. Katz (Ed.), *Handbook of clinical audiology*, 4e éd., (pp. 406-423). Baltimore : Williams & Wilkins.

Leroux, T., Lalonde, M., Désilets, F., Fortier, P. & Laroche, C. (1993). Proposition d'une nomenclature enrichie des capacités liées au sens et à la perception-audition. *Réseau international CIDIH*, 5 et 6, 35-39.

Liasis, A., Bamiou, D.E., Campbell, P., Sirimanna, T., Boyd, S. & Towell, A. (2003). Auditory event-related potentials in the assessment of auditory processing disorders : A pilot study. *Neuropediatrics*, 34, 23-29.

Liegeois-Chauvel, C., Musolino, A., Badier, J.M., Marquis, P. & Chauvel, P. (1994). Evoked potentials recorded from the auditory cortex in man: Evaluation and topography of the middle latency components. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 92(3), 204-214.

- Ling, A.H. (1975). Memory for verbal and nonverbal auditory sequences in hearing-impaired and normal-hearing children. *Journal of the American Audiology Society*, 1, 37-45.
- Lu, Y., Harris, J-A. & Rube, E-W (2007). Development of spontaneous miniature EPSCs in mouse AVCN neurons over a critical period of afferent-dependent neuron survival *Journal of Neurophysiology*; 97, 635–646.
- Luck, S.J. (2005). *An introduction to the event-related potential technique*. Cambridge : The MIT Press.
- Lynch, A. & Normandin, N. (1983). SSI: Élaboration d'une version française et application auprès d'une population d'enfants avec troubles d'apprentissage. Thèse de Maîtrise non publiée, Université de Montréal, Montréal.
- Mody, M., Studdert-Kennedy, M., & Brady, S. (1997). Speech perception deficits in poor readers: Auditory processing or phonological coding? *Journal of Experimental Child Psychology*, 64, 199-231.
- Most, T. (2004). The effects of degree and type of hearing loss on children's performance in class. *Deafness & Education International*, 6(3):154-166.
- Musiek FE (1994), Frequency (pitch) and duration pattern tests, *Journal of American Academy of Audiology*, 5, 265—268.
- Musiek, F.E., Baran, J.A. & Pinheiro, M.L. (1990). Duration pattern recognition in normal subjects and patients with cerebral and cochlear lesions. *Audiology*, 29, 304-313.

Musiek, F.E. & Lee, W. (1999). Auditory middle and late potentials. Dans F. Musiek & W. Rintelmann (Ed.), *Contemporary Perspectives in Hearing Assessment* (pp. 243-271), Boston : Allyn & Bacon.

Musiek, F.E. & Pinheiro, M.L. (1987). Frequency patterns in cochlear, brainstem, and cerebral lesions. *Audiology*, 26, 79-88.

Näätänen, R. (2000). Mismatch Negativity (MMN): Perspectives for application. *International Journal of Psychophysiology*, 37, 3-10.

Näätänen, R. (1992). *Attention and brain function*. N.J. Hillsdale : Erlbaum.

Näätänen, R. (1990). The role of attention in auditory information processing as revealed by event-related potentials and other brain measures of cognitive function. *Behavioral and Brain Sciences*, 13, 201-288.

Näätänen, R. Gaillard, A.W.K. & Mäntysalo, S. (1978). Early selective-attention effect on evoked potential reinterpreted. *Acta Psychologica*, 42, 313-329.

Näätänen, R. & Picton, T. (1987). The N1 wave of the human electric and magnetic response to sound : A review and analysis of the component structure. *Psychophysiology*, 24, 375-425.

Näätänen, R., Tervaniemi, M., Sussman, E., Paavilainen, P. & Winkler, I. (2001). "Primitive intelligence" in the auditory cortex. *Trends in Neuroscince*, 24, 283-8.

Näätänen, R. & Winkler, I. (1999). The concept of auditory stimulus representation in cognitive neuroscience. *Psychological bulletin*, 125, 826-859.

Neijenhuis, K., Tschur, H. & Snik, A. (2004). The effect of mild hearing impairment on auditory processing tests. *Journal of the American Academy of Audiology*, 15 (1), 6-16.

Oates, P.A., Kurtzberg, D. & Stapells, D.R. (2002). Effects of sensorineural hearing loss on cortical event-related potential and behavioral measures of speech-sound processing. *Ear & Hearing*, 23, 399-415.

Parving, A. (1993). Congenital hearing disability, epidemiology and identification: A comparison between two health authority districts. *International Journal of Pediatric Otolaryngology*, 27, 29-46.

Perrault, N. & Picton, T.W. (1984). Event-related potentials recorded from the scalp and nasopharynx. I. N1 and P2. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 47, 637-647.

Pichora-Fuller, K.M., Scheider, B., et Daneman, M. (1995). How young and old adults listen to and remember speech in noise. *Journal of the Acoustical Society of America*, 97, 593-608.

Pinheiro, M.L. & Musiek, F.E. (1985). Sequencing and temporal ordering in the auditory system. In F.E. Musiek & M.L. Pinheiro (Eds.), *Assessment of central auditory dysfunction: Foundations and clinical correlates* (pp. 219-238). Los Angeles: Williams & Wilkins.

Polen, S. B. (1984). Auditory event related potentials. *Seminars in Hearing*, 5, 127-141.

Ponton, C W., Don, M., Eggermont, J.J., Waring, M.D., Kwong, B. & Masuda, A. (1996). Auditory system plasticity in children after long periods of complete deafness. *Neuroreport*, 8(1), 61-5.

Ponton, C.W., Moore, J.K. & Eggermont, J-J. (1999). Prolonged deafness limits auditory system developmental plasticity: evidence from an evoked potentials study in

children with cochlear implants. *Scandinavian audiology*. Suppl, 51, 13-22.

Ponton, C.W., Eggermont, J-J, Kwong, B. & Don, M: (2000). Maturation of human central auditory system activity: evidence from multi-channel evoked potentials. *Clinical Neurophysiology*; 111,220-236.

PsychLab (1992). Logiciel. Version 1. Teren Gum, Montréal, Canada.

Raja-Beharelle, A., Dick, AS., Josse, G., Solodkin, A., Huttenlocher, PR., Levine, SC & Small, SL. (2010). Left hemisphere regions are critical for language in the face of early left focal brain injury. *Brain*, 133, 1707-1716.

Rance, G., Cone-Wesson, B., Wunderlich, J. & Dowell, R. (2002). Speech perception and cortical event related potentials in children with AN. *Ear & Hearing*, 23, 239-253.

Raven, J. (1956). *Coloured Progressive Matrices*. London : H.K Lewis & Co.

Roggia, S.M. & Colares, N.T. (2008). Mismatch negativity in patients with (central) auditory processing disorders. *Brazilian Journal of Otorhinolaryngology*, 74, 705-11.

Roy, S. (2000). *Évaluation de la capacité d'organisation séquentielle auditive d'adultes ayant une acuité auditive normale*. Travail dirigé. Université de Montréal, Montréal, Canada.

Rudmin, F. & Normandin, N. (1983). Experimental dichotic tests in French modeled on SSW design. *Human Communication Canada*, 7, 348-360.

Shahin, A., Bosnyak, D.J., Trainor, L.J. & Roberts, L.E. (2003). Enhancement of Neuroplastic P2 and N1c Auditory Evoked Potentials in Musicians. *The Journal of Neuroscience*, 23, 5545-5552.

Sharma, A., Dorman, M.F. & Kral, A. (2005). The influence of a sensitive period on central auditory development in children with unilateral and bilateral cochlear implants. *Hearing Research*, 203, 134-143.

Sharma, A., Dorman, M.F. & Spahr, A.J. (2002 a). Rapid development of cortical auditory evoked potentials after early cochlear implantation. *Neuroreport*, 13 (10), 1365-8.

Sharma, A., Dorman, M.F. & Spahr, A.J. (2002 b). 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.

Sharma, M., Purdy, S.C., Newall, P., Wheldall, K., Beaman, R. & Dillon, H. (2006). Electrophysiological and behavioural evidence of auditory processing disorders in children with reading disorders. *Clinical Neurophysiology*, 117, 1130-1144.

Stach, B.A. (1997). *Comprehensive dictionary of audiology, illustrated*. Baltimore: William & Wilkins.

Statistics Canada 2010. Population by sex and age group. Récupéré le 01 aout 2011 de <http://www40.statcan.gc.ca/101/cst01/demo10a-eng.htm>

Sussman, E., Steinschneider, M., Gumenyuk, V., Grushko, J. & Lawson, K. (2008). The maturation of human evoked brain potentials to sounds presented at different stimulus rate. *Hearing Research*, 236, 61-79.

Sutton, S., Braren M., Zubin, J. & John, E. R. (1965). Evoked potential correlates of stimulus uncertainty. *Science*, 150, 1187-1188.

Tang, J.G., Li, W., Chai, L & Cai, Y. (2006). Follow-up after newborn and infant hearing screening. *Otolaryngology-head and neck surgery*, 135, 810-813.

Trune, D.R. & Morgan, C.R. (1988). Influence of developmental auditory deprivation on neuronal ultrastructure in the mouse anteroventral cochlear nucleus. *Developmental Brain Research*, 42, 304-308.

Wake, M., Hughes, E.K., Poulakis, Z., Collins, Ch. & Rickards, F.W. (2004). Outcomes of Children with Mild-Profound Congenital Hearing Loss at 7 to 8 Years: A Population Study. *Ear & Hearing*, 25, 1-8.

Wall, L.G., Dalebout, S.D., Davidson, S.A. & Fox, R.A. (1991). Effect of hearing impairment on event-related potentials for tone and speech distinctions. *Folia Phoniatica*, 43, 265-274.

Warren, R.M. (1994). La perception des séquences acoustiques: intégration globale ou résolution temporelle? Dans McAdams, S. & Bigand, E. (Eds.), *Penser les sons: psychologie cognitive de l'audition* (pp. 41-73). Paris: Presses Universitaires de France.

Watkin, P.M., Baldwin, M. & McEnery, G. (1991). Neonatal at risk screening and the identification of deafness. *Archives of Disease in Childhood*, 66, 1130-1135.

White, K.R. & Behrens, T.R. (1993). The Rhode Island hearing assessment project: implications for universal newborn hearing screening. *Seminars in Hearing*, 14, 1-119.

Willott, J.F. (1996). Physiological plasticity in the auditory system and its possible relevance to hearing aid use, deprivation effects, and acclimatization. (1996). *Ear & Hearing* 17:66S-77S.

Willott, J.F. (1984). Changes in frequency representation in the auditory system of mice with age related hearing impairment. *Brain Research*. 309: 159-162.

Willott, J.F., Aitkin, L.M. & McFadden, S.M. (1993). Plasticity of auditory cortex associated with sensorineural hearing loss in adult C57BL/6J mice. *Journal of comparative neurology*. 329: 402-411.

Wunderlich, J.L., Cone-Wesson, B.C. & Shepherd, R. (2006). Maturation of the cortical auditory evoked potential in infants and children. *Hearing Research*, 212, 185-202.

Annexes

Annexe A

Peripheral hearing loss and auditory temporal-ordering ability in children.

Article publié dans
International Journal of Pediatric Otorhinolaryngology
2010

Koravand, A., Jutras, B. & Roumy, N. (2010). Peripheral hearing loss and auditory temporal-ordering ability in children. *International Journal of Pediatric Otorhinolaryngology*, 74, 50-55.

Peripheral hearing loss and auditory temporal ordering ability in children

Amineh Koravand

École d'orthophonie et d'audiologie, Université de Montréal
and Centre de recherche, CHU Sainte-Justine

Benoît Jutras

École d'orthophonie et d'audiologie, Université de Montréal
and Centre de recherche, CHU Sainte-Justine

Nada Roumy

École d'orthophonie et d'audiologie, Université de Montréal
and Centre de recherche, CHU Sainte-Justine

KEY WORDS: Peripheral hearing loss, auditory sequential organization, temporal ordering, auditory processing

Corresponding author:

Amineh Koravand, Centre de recherche du CHU Sainte-Justine, 3175 Cote Sainte-Catherine, Montréal, Québec, H3T 1C5

Abstract:

Objective: The main objective of this study was to assess the influence of peripheral hearing loss (abnormal encoding of the auditory system) on auditory information processing. We examine the ability of children with and without hearing loss to correctly reproduce sequence blocks of acoustic stimuli that vary in type, number, and temporal ordering. **Methods:** Twenty-six children between 8 and 12 years old, 13 with hearing loss and 13 without hearing loss, participated in the study. They performed an auditory temporal ordering task (auditory sequential organization task) by recalling two, three, and five verbal (/ba/-/da/ and /a/-/da/) and nonverbal stimuli (acoustic transformation of /ba/-/da/) with a fixed interstimulus interval (ISI) of 425 ms. They also reproduced sequences of two elements with variables ISI, 20, and 1000 ms. **Results:** Children with hearing loss had significantly lower correct responses than children with normal hearing for sequences of two, three, and five verbal stimuli with similar and complex acoustic features (/ba/-/da/), for an ISI of 425 ms. There was no significant difference in performance between children with hearing loss and their peers with normal hearing on nonverbal sequences or verbal sequences with different and complex acoustic features (/a/-/da/) when ISI was 425 ms. Furthermore, children with hearing loss performed significantly lower than their peers on the three groups of stimuli when ISI was 20 ms between two stimuli. **Conclusion:** Peripheral hearing loss can influence auditory information processing in the central auditory system.

Introduction

Auditory sequential organization (ASO) refers to the ability to keep all the elements of an acoustic sequence in the correct order [1]. This ability plays an important role in speech perception [2]. Different components such as temporal resolution, temporal integration, the perception of temporal order, and short-term memory capacity underlie ASO ability [3]. Temporal resolution refers to the ability of a listener's auditory system to resolve/separate auditory events or perceive changes in auditory stimuli over time [4]. Temporal integration refers to the ability of a listener's auditory system to sum acoustic information over time to improve detection, recognition, and discrimination of stimuli [4]. The perceptual processing of duration and temporal order is generally believed to be a function of the central auditory system [5].

Individuals with sensorineural hearing loss usually perform significantly poorer on temporal resolution [6], [7], [8], temporal integration [9], [10], and recalling the order of acoustic stimuli [11], [12], [13], [14] than normal-hearing peers. Inner ear damage not only generates loss of auditory acuity, but also influences the temporal analysis of acoustic stimuli, which could consequently affect performance on ASO tasks. Studies on temporal analysis have revealed that individuals with sensorineural hearing loss need a longer silence duration between two stimuli to perceive them as two distinct stimuli compared to individuals with normal hearing sensitivity [6], [7]. The effect of hearing loss indicates that peripheral mechanisms influence the processing of temporal aspects of speech cues.

Further supporting evidence for diminished temporal processing abilities in individuals with hearing loss is provided by studies that used more complex stimuli or increased

task demands. For example, Ling (1975) assessed the auditory sequential organization ability of children with and without sensorineural hearing loss [12]. Children completed ASO sequence tasks involving two, three, and four verbal or nonverbal stimuli at variable interstimulus interval (ISI) durations, i.e., short-duration (50 ms), mid-duration (300 ms), and long-duration (800 ms) intervals. Results of Ling's study demonstrate that, for all ISI durations, children with hearing loss performed more poorly than those with normal hearing on sequences of verbal stimuli comprising two, three, and four elements. For nonverbal sequences, children with hearing loss (from 6 to 14 years old) obtained better results than younger children with normal hearing (5-year-olds) but worse results than older children (9-year-olds) with normal hearing. In short, Ling's study suggests that children with hearing loss experience more difficulties than their peers with normal hearing on auditory temporal ordering tasks. However, there was insufficient information to determine whether the poorer performance of children with hearing loss on ASO tasks was attributable to reduced perceptual abilities or whether it was the consequence of poorer short-term memory ability.

More recently, Jutras and Gagné (1999) [13] evaluated sequential organization performance in 48 children divided into four groups: 12 with normal hearing and 12 with hearing loss aged 6 and 7 years old; and 12 with normal hearing and 12 with hearing loss aged 9 and 10 years old. All children completed ASO tasks with verbal (/ba/ and /da/) and nonverbal (a 1 kHz pure tone and a wide band noise) acoustic stimuli. Overall results indicate that children with hearing loss performed significantly poorer than those with normal hearing on /ba/ and /da/. However, children with and without hearing loss performed similarly on nonverbal stimuli. These results suggest

that difficulties experienced by children with hearing loss are related more to perceptual processes than to short-term memory. The performance of children with hearing loss could have been influenced by the fact that verbal stimuli (/ba/-/da/) were more acoustically similar and complex to process than nonverbal stimuli. However, the nature of the difficulties of children with hearing loss is not yet fully understood. Is the poorer performance on ASO tasks associated with perceptual difficulties (problems in processing auditory information) or due to a speech perception deficit?

There are several potential benefits to examining auditory sequential organization ability in children with hearing loss. First, measures that reveal the most prominent deficits could be adapted for clinical use to identify children with hearing loss who might require auditory training for specific stimuli. Second, an examination of children's performance on a range of simple and complex listening tasks could help identify the influence of peripheral hearing loss on central processing ability.

The current study has two main objectives: (1) to examine whether results similar to those found in Jutras and Gagné (1999) [13] would be obtained with other verbal and nonverbal stimuli; and (2) to determine whether the difficulties experienced by children with hearing impairment are the consequence of problems with speech perception or more extensive problems with auditory processing.

Methods

Participants

Two groups of 8- to 12-year-old French-speaking children participated in the study: 1) 13 with normal hearing sensitivity; and 2) 13 with sensorineural hearing impairment. Groups were matched for age and gender. Mean age of children with hearing loss was 9

years, 8 months (SD = ± 11 mo) and mean age of children with normal hearing was 9 years, 10 months (SD = ± 10 mo). All normal-hearing subjects passed a hearing screening test, detection threshold of 15 dB HL or less for octave frequencies between 500 Hz and 8 kHz, bilaterally [15] (re: ANSI, 1996). The 250 Hz octave frequency was not assessed since these children were not tested in a soundproof booth, but in a quiet room. In this environment, even low level background noise could interfere with test results at 250 Hz and elevate the child's normal threshold in this particular frequency. The 8000 Hz hearing threshold was missing in the audiological report of some children with hearing loss. Average hearing sensitivity thresholds of children with hearing loss, based on the average of 500, 1000, and 2000 Hz pure-tone thresholds, was within the limits of mild to moderately severe hearing loss (according to Clark's classifications [16], Table 1). These children had regularly worn hearing aids for at least two years prior to the experiment. All children were educated in the regular school system and their mode of communication was oral. All children had normal tympanograms (admittance curve with a single peak between +50 to -100 daPa using a 226 Hz probe tone) and no history of otologic or neurologic disorder. All children were right handed. Lateral dominance was evaluated according to the protocol proposed by De Agostini and Dellatolas (1988) [17]. The study was approved by the Ethics Committee of the Sainte-Justine Hospital.

Insert Table 1

Materials and Equipment

Two types of stimuli were used for this study – verbal and nonverbal – to help identify whether the difficulties of children with hearing loss in auditory sequential organization tasks were related to speech perception or to auditory perception problems. The first verbal pair consisted of two synthetic syllables /ba/-/da/ and the second pair consisted of /a/-/da/.

The stimuli /ba/ and /da/, each 250 ms in duration, were composed of three formants. The two syllables had identical portions with F1. However, the difference between them was at the second formant level, in the formant transition between the consonant and the vowel. Thus, the 2nd formant transition for /ba/ started at 953 Hz and finished at 1302 Hz and the 2nd formant transition for /da/ started at 1575 Hz and finished at 1302. The 3rd formant of /ba/ and /da/ shared almost the same acoustical feature: for the syllables /ba/, it started at 2584 Hz and finished at 2510 Hz and for the syllables /da/ it started at 2586 Hz and finished at 2510 Hz.

Stimuli were selected from the CD-ROM *Speech Production and Perception I* [18]. The pair of syllables /a/-/da/ was used because it requires complex acoustical processing but is easier to differentiate than the pair /ba/-/da/. Thus, the syllables /ba/-/da/ are similar but differ in terms of place of articulation, whereas in the pair /a/-/da/, the first syllable is composed of a vowel, which can be easily differentiated from the second syllable, which contains a vowel and a consonant. The use of two different verbal stimuli categories can provide valuable information on perceptual processing. If children with hearing loss performed similarly on these two pairs of stimuli, their

difficulties might indeed arise from speech perception deficit, but if children performed better on /a/-/da/ than /ba/-/da/, their difficulties could be related more to auditory processing than speech perception.

Nonverbal stimuli consisted of synthesized transformations of the verbal stimuli /ba/-/da/, each composed of two sine waves identical to those of the center frequencies of the second and third formant frequencies in the synthetic /ba/-/da/ [19]. However, they differed perceptually from their corresponding speech sounds. Using these stimuli can provide supportive information on the processing of complex acoustic signals as well as the perception of temporal order without the contribution of speech processing. Nonverbal stimuli were generated using Dr. Speech [20] and Mitsyn software [21]. Verbal and nonverbal stimuli created for this study were 250 ms in duration with 2.2 ms rise and fall times. Stimuli were stored on a Macintosh portable computer (PowerBook G4) connected to an audiometer (Madsen Itera). Stimuli were presented to the right ear through a TDH-39 earphone. Stimulus sequences and inter-stimuli intervals (ISI) were controlled by PsychLab software [22].

Procedure

The parents of all participants were asked to read and sign a consent form. The children also gave their consent to participate in the study. All children participated in a minimum of two sessions. During the first session, the children completed the Coloured Progressive Matrices test [23] to evaluate nonverbal reasoning ability. This test consists of 36 multiple choices involving abstract reasoning. For each test item, the participant is asked to identify, from a closed set of six, the missing segment required to complete a larger pattern [23]. The children also completed a hearing detection threshold test (if

results of these measures were not already available) and a laterality test [17]. An adapted protocol of laterality test was used to examine dominance, handedness, footedness, and eyedness. Finally, the children performed the ASO tasks. Prior to the ASO tasks, all children were asked to complete a stimulus-button association task and an identification test using the same stimuli as used in the study. Stimuli were presented by earphone to the right ear at 55 dB HL for children with normal hearing. For those with hearing loss, the stimulus presentation was adjusted to a level that the child found comfortable, which was between 65 and 105 dB HL (Table 1). Stimuli were presented to the right ear by earphone, since individuals with hearing loss present a right ear advantage for auditory pattern recognition [24]. For the stimulus-button association task, the children were seated at a table facing a response box with two identical buttons. They were first trained to which of the two buttons to press in response to each of the verbal and nonverbal stimuli separately.

This test comprised ten presentations of each syllable or ten presentations of each nonverbal stimulus to the participants at a comfortable level. When the children were able to perform this task, they progressed to the identification test, in which the children were asked to identify a randomly presented stimulus by pressing the correct button on the response box after each presentation. No feedback was provided to the children. Once they correctly identified 18 out of 20 (90%) of the verbal and nonverbal sounds, they performed the auditory sequential organization test. The identification test criteria ensured that all children were able to perceive and recognize the verbal and nonverbal stimuli before presenting them in sequence. During the auditory sequential organization test, the children completed the following two tasks with both verbal and

nonverbal stimuli: (1) reproduction, in order, of sequences of two, three, and five elements with a fixed ISI of 425 ms; and (2) reproduction, in order, of sequences of two elements with ISI durations of 20 and 1000 ms. In sum, the children completed 15 blocks of 10 different sequences. The number of stimuli presented in a sequence remained constant for each block. Blocks and sequences were presented in random order across the children. To ensure reliability, a second session was conducted. In the second session, the children repeated the stimulus-button association task, identification task, and auditory sequential organization test with verbal and nonverbal stimuli. When there was a greater than 20% difference between results of the first and second session for a given experimental condition, they completed a third trial block.

Results

Raven's Coloured Progressive Matrices

Nonverbal reasoning ability was assessed by Raven's Coloured Progressive Matrices [23]. Mean group score was above the 80th percentile, ranging from the 75th to 95th percentile, according to the test norms [23]. Mean group scores for children with normal hearing and hearing loss were 33.15 (SD = 1.91) and 32 (SD = 2.83) out of 36, respectively. Results indicate no significant difference between children with normal hearing and those with hearing loss [$t(24) = 1.22, p > .05$].

Identification Test

For identification test, a participant's performance was determined by calculating the average number of correct responses obtained during the first and the second sessions. All children in both groups passed the identification criteria for the verbal pair /a/-/da/.

However, verbal /ba/-/da/ was reproduced by only seven children with hearing loss, or 54% of the children in this group and 13 children with normal hearing. The nonverbal stimuli were reproduced by ten children with hearing loss (77% of these children) and 11 children with normal hearing (85%).

Auditory Sequential Organization Test

For each experimental condition, average numbers of correct responses were calculated from the scores on the first and second sessions. If a third trial was performed by a given child in some experimental conditions, average number of correct responses was calculated from the two out of three trial blocks with the closest performance. Twelve children with normal hearing and 13 children with hearing loss were asked to perform a third block of trials for at least one experimental condition.

For the statistical analysis, the average value calculated for each group of participants was used to complete the missing cells. Missing cells were due to the fact that some children, with or without hearing loss, did not attain the criteria of 90% in the identification test.

Number of Elements per Sequence

Results of verbal and nonverbal sequences of two, three, and five elements correctly reproduced by children with normal hearing and with hearing loss are presented in Figure 1. ISI duration was 425 ms. A three-way ANOVA was performed (group, type of stimuli, and number of elements per sequence), with repeated measures for type and number using SPSS software. Data were previously submitted to an arcsine transform. Results reveal significant effects of all three main factors: Group (children with normal

hearing vs. children with hearing loss), Type (verbal /a-/da/, verbal /ba-/da/ and nonverbal), and Number (two, three, and five elements per sequence). Two-way interaction was significant for Group x Type and Number x Type. However, no significant differences were found for the other two-way interaction, Group x Number, nor for the three-way interaction, Group x Type x Number (Table 2).

Insert Table 2

Analysis of simple effects for the significant interaction of Group x Type showed that the group factor effect was significant for the verbal stimuli /ba-/da/ [$F(1, 24) = 45.80$, $p < .001$]. However, there was no significant difference between groups for the verbal stimuli /a-/da/ or the nonverbal stimuli.

Analysis of simple effects for the significant interaction of Type x Number revealed a significant difference between verbal and nonverbal stimuli for sequences of two [$F(2, 75) = 7.18$, $p < .001$] and three elements [$F(2, 75) = 4.95$, $p < .05$]. For sequences of five elements, this difference was not significant. Bonferroni corrections were applied to adjust multiple comparison probabilities. For the two-element sequence, a statistical analysis (t test) revealed a significant difference between verbal /a-/da/ and verbal /ba-/da/ [$t(25) = 3.50$, $p < .01$] and between verbal /a-/da/ and nonverbal [$t(25) = 4.06$, $p < .001$]. There was no significant difference between verbal /ba-/da/ and nonverbal [$t(25) = 0.55$, $p > .016$]. For the three-element sequence, a statistical analysis (t test) revealed a significant difference between verbal /a-/da/ and nonverbal stimuli [$t(25) = 3.70$, $p < .01$] only. No significant differences were measured between the trial blocks

comprising three verbal /ba-/da/ and nonverbal elements [$t(25) = 0.44, p > .016$], or between the blocks of verbal /a-/da/ and /ba-/da/ elements [$t(25) = 2.41, p > .016$].

Insert Figure 1

Interstimulus Interval (ISI) Duration

Figure 2 presents the results obtained on trial blocks involving sequences of two nonverbal or verbal stimuli as a function of ISI duration (20, 425, and 1000 ms). A three-way ANOVA (group, type of stimuli, and ISI duration) was performed with repeated measures for type and ISI. Data were previously submitted to an arcsine transform. Results revealed significant effects of all three main factors: Group (children with normal hearing vs. children with hearing loss), Type (/a-/da/, /ba-/da/ and nonverbal), and ISI duration (20, 425 and 1000 ms). Significant effects were obtained for double interaction of ISI x Type. Two-way interaction, Group x ISI, Group x Type, Group x Type and three-way interaction of Group x Type x ISI were not significant (Table 3).

Insert Table 3

Analysis of simple effects for the significant interaction of Type x ISI duration revealed a significant difference between verbal and nonverbal stimuli for all ISI durations. Bonferroni corrections were applied to adjust multiple comparison probabilities. For 20 ms of ISI, statistical analysis (t test) revealed a significant difference between verbal

/a/-/da/ and verbal /ba/-/da/ [$t(25) = 2.70, p < .016$], between verbal /a/-/da/ and nonverbal [$t(25) = 5.13, p < .001$], and between verbal /ba/-/da/ and nonverbal [$t(25) = 3.45, p < .001$] stimuli. For 425 ms of ISI, statistical analysis (t test) revealed a significant difference between verbal /a/-/da/ and nonverbal [$t(25) = 3.95, p < .01$] stimuli, and between blocks of verbal /a/-/da/ and /ba/-/da/ [$t(25) = 3.60, p < .01$]. No significant differences were measured between trial blocks comprising two verbal /ba/-/da/ and nonverbal stimuli [$t(25) = 0.26, p > .016$] with 425 ms of ISI. For 1000 ms of ISI, statistical analysis (t test) revealed a significant difference between verbal /a/-/da/ and nonverbal stimuli [$t(25) = 3.99, p < .01$], and between blocks of verbal /a/-/da/ and /ba/-/da/ [$t(25) = 2.63, p < .016$]. No significant differences were measured between trial blocks comprising two verbal /ba/-/da/ and nonverbal stimuli [$t(25) = 1.81, p > .016$] with 1000 ms of ISI.

Insert Figure 2

Discussion

One of the aims of this study was to examine whether results similar to those in Jutras and Gagné (1999) [13] would be obtained with other verbal and nonverbal stimuli. Results revealed that children with hearing loss performed significantly worse than peer controls, mainly in recalling verbal sequences with complex and similar acoustical features (/ba/-/da/). These findings were obtained regardless of the number of elements in the sequences or ISI duration. Results are compatible with those of Jutras and Gagné (1999) [13] and Dawson, Busby, McKay et al. (2002) [25], who found a reliable difference between children with normal hearing and children with peripheral hearing

loss in verbal sequence recall in ASO tasks. Another objective of this study was to determine whether the difficulties experienced by children with hearing impairment are the consequence of problems with speech perception or due to more extensive auditory processing problems.

Our findings suggest that auditory sequential organization difficulties in children with hearing loss are not exclusively attributable to one of the two common hypothetical mechanisms: difficulties with speech perception and general perceptual processing deficits. Instead, the mainly lower performance with /ba-/da/ could be attributed to an interaction between the complexity and similarity of the verbal stimuli. We propose two hypotheses to partly explain the difficulties that children with hearing loss had with /ba-/da/ in the ASO task: an acoustical hypothesis and a linguistic hypothesis.

According to the acoustical hypothesis, the pair /ba-/da/ and the nonverbal stimuli share the same acoustical characteristics for the 2nd and 3rd formants. A possible explanation would be that the auditory system of children with hearing loss would require more processing for /ba-/da/ than for nonverbal stimuli. Indeed, the syllable pair /ba-/da/ contains more elements for the auditory system to process than the nonverbal stimuli. As mentioned above, the nonverbal stimuli included two of the three formants of /ba/ and /da/. Consequently, there would be more risk of auditory processing difficulties with /ba-/da/ than with the nonverbal stimuli; because the distinctive feature – the 2nd formant – could be mixed with a greater quantity of information for /ba/ and /da/ than for the nonverbal stimuli. To verify the acoustic hypothesis, it would be necessary to undertake a study using other, acoustically similar nonverbal stimuli, including only the second formant. If the performance of the two

groups of children were similar on this task, we could posit that the quantity of information to process (a number of formants) was a factor contributing to the poor performance by children with hearing loss on the syllables /ba/-/da/. On the other hand, this assumption would no longer hold if children with hearing loss performed more poorly than controls.

According to the linguistic hypothesis, the children had to identify the verbal stimuli /ba/-/da/ on a predetermined phonological basis, whereas they were able to choose between two different labels for the nonverbal stimuli. The phonological base might be less well defined in children with hearing loss than in normal-hearing children. Perception of place of articulation for consonants is particularly susceptible to the effects of sensorineural hearing loss [26], [27], [28]. It is possible that for children with hearing loss, the phonetic trace is more susceptible to interference, especially for stimuli sharing similar acoustic cues. Polen (1984), using a /v/ and /t/ pair with adults with hearing loss, explained that perception of some phonemes is less well defined in individuals with hearing loss compared to subjects with normal hearing [29]. However, the children in our study were able to identify the syllable in the identification test, in which only one stimulus was presented at each trial. Therefore, the children with hearing loss had as much time as they needed to process the stimulus. However, in the auditory sequencing tasks the time allowed to process a stimulus was limited by ISI duration or the number of elements. Moreover, the identification test was a simple task compared to the auditory sequencing tasks, in which children had to encode, maintain, and recall sequential patterns. The presentation of several different elements in quick succession may lead to atypical decoding due to auditory processing overload for

children with hearing loss [14]. It would be interesting to investigate whether similar results would be obtained with other verbal stimuli having complex and similar acoustic features, for example, /ga/-/da/. These findings could provide some insight into the perceptual difficulties observed among children with hearing loss.

Finally, children with hearing loss might also have difficulties with the speed of auditory information processing. On the ASO task comprising two stimuli presented with an ISI of 20 ms, the number of correct responses by children with hearing loss was significantly lower than peer controls for the three pairs of stimuli. This could be explained by what we have called a temporal hypothesis. When the ISI between two auditory stimuli is limited to 20 ms, the auditory system has to contend with rapid processing of the stimuli. The auditory system of children with hearing loss could require extra time to process the acoustic stimuli due to a slowing down of the system. The limited time window available for perceiving the pair of stimuli and labeling them might overburden their temporal resolving power and capacity for processing sequential information. With a longer ISI (425 and 1000 ms), children with hearing loss were able to perform the task with the stimuli /a/-/da/ just as well as children with normal hearing.

Our findings show that a combination of speech and non-speech temporal ordering measures can be used to effectively distinguish the performance patterns of children with and without hearing loss. Additionally, these findings suggest that a single measure cannot accurately capture the deficit range in auditory sequential organization ability observed in children with hearing loss. The variability in performance among

hearing impaired children on the different auditory sequential organization measures is attributed to the relative influence of peripheral and central effects associated with the processing demands of the selected speech and non-speech tasks.

Limitations of the study

This study has some limitations that should be taken into account when considering the results and contributions. The results for /ba/-/da/ stimuli are based on only 54% of the children with hearing loss, since only seven of thirteen children with hearing loss were able to accurately identify 90% of these verbal stimuli. It is therefore doubtful whether hearing loss severity as a factor could explain why 46% of children did not achieve the identification criteria (90%) for /ba/-/da/ syllables. Data were closely examined to determine whether severity of hearing loss could be related to the children's performance on the identification and OSA tasks. Children's scores could not be predicted by simply knowing their degree of peripheral hearing loss. Children with similar degrees of hearing loss show different performance patterns on identification and OSA tasks. Moreover, some children with hearing loss and better hearing thresholds than other children did not perform better on OSA tasks.

A second limitation is the fact that the results of the present study cannot be generalized to all children with sensorineural hearing loss, since children with profound hearing loss or children using cochlear implant were not investigated.

Summary and Future Directions

Our results demonstrate that auditory sequential organization abilities on specific verbal stimuli were impaired in children with varying degrees of sensorineural hearing loss. The overall results do not suggest a direct relationship between performance and degree of hearing loss. This finding could be interpreted as supporting the use of OSA tests to more extensively investigate auditory abilities in this group of children. A future direction would be to determine whether these behavioral measures could be used to develop a clinical protocol to evaluate auditory processing in children with hearing loss. Furthermore, profiles of children with hearing loss, based on mean performance on auditory sequential organization tests, could be used to develop normative data. These data would be used to help identify central auditory disabilities in children with hearing loss. Targeting these disabilities would provide directions to develop specific treatments for children with hearing loss, and hopefully would lead to more effective interventions.

Moreover, it would be useful to explore identification skills in greater depth by evaluating discrimination ability, which is one of the prerequisite identification skills. Children's difficulties in identifying stimuli pairs may have stemmed from a discrimination deficit.

Acknowledgments

This research was funded in part by the *Réseau provincial de recherche en adaptation-réadaptation* (REPAR), the Research Center of CHU Sainte-Justine, and The Hearing Foundation of Canada. The authors are grateful to the children and their parents who invested considerable time and effort to participate in this research project. We are very grateful to Marilene Gagnon and Josee Rioux for their assistance in conducting the various phases of the research project.

References

- [1] Leroux T, Lalonde M, Désilets F, Fortier P, Laroche C. Proposition d'une nomenclature enrichie des capacités liées au sens et à la perception-audition. Réseau int CIDIH 1993; 5 & 6: 35-39.
- [2] Hirsh IJ. Auditory perception of temporal order. J Acoust Soc Am 1959; 31: 759-767.
- [3] Jutras B, Gagné JP. L'organisation séquentielle de stimuli acoustiques: cadre conceptuel et implications cliniques. (Sequential Organization of Acoustical Stimuli: Conceptual Framework and Clinical Implications). J Speech-Lang Pathol and Audiol/Revue d'orthoph et d'audiol 1996; 20: 197-206.
- [4] Moore BC. J. An Introduction to the Psychology of Hearing, 5th ed. Academic Press, Amsterdam: Boston London, 2003.
- [5] Pinheiro ML, Musiek FE. Sequencing and temporal ordering in the auditory system. In FE. Musiek, ML. Pinheiro (eds.), Assessment of central auditory dysfunction: Foundations and clinical correlates. Los Angeles: Williams & Wilkins, 1985; 219-238.
- [6] Fitzgibbons PJ, Gordon-Salant S. Minimum stimulus levels for temporal gap resolution in listeners with sensorineural hearing loss. J Acoust Soc Am 1987; 81: 1542-1545.

- [7] Glasberg BR, Moore, BCJ. Psychoacoustic abilities of subjects with unilateral and bilateral cochlear hearing impairments and their relationship to the abilities to understand speech. *Scand Audiol Suppl* 1989; 32: 1-25.
- [8] Nelson PB, Dwyer Thomas S. Gap detection as a function of stimulus loudness for listeners with and without hearing loss. *J Speech Lang Hear Res* 1997; 40: 1387-1394.
- [9] Dempsey JJ, Maxon AB. Temporal integration functions in hearing-impaired children. *Ear Hear* 1982; 3: 271-273.
- [10] Florentine M, Fastl H, Buus S. Temporal integration in normal hearing, cochlear impaired, and impaired simulated by masking. *J Acoust Soc Am* 1998; 84: 195-203.
- [11] Grose JH, Hall JW. Perceptual organization of sequential stimuli in listeners with cochlear hearing loss. *J Speech Hear Res* 1996; 9: 434-440.
- [12] Ling AH. Memory for verbal and nonverbal auditory sequences in hearing-impaired and normal-hearing children. *J Am Audiol Soc* 1975; 1: 37-45.
- [13] Jutras B, Gagné JP. Auditory sequential organization among children with and without a hearing loss. *J Speech Lang Hear Res* 1999; 42: 553-567.

- [14] Rose MM, Moore BCJ. Perceptual grouping of tone sequences by normally hearing and hearing impaired listeners. *J Acoust Soc Am* 1997; 102: 1768-1778.
- [15] ANSI- American National Standard Institute. *Am Na Stand Specific Audiometers*. New York: USA Standard, 1996.
- [16] Clark JG. Uses and abuses of hearing loss classification. *Asha* 1981; 23: 493–500.
- [17] De Agostini M, Dellatolas G. Une épreuve simple pour évaluer la préférence manuelle chez l'enfant à partir de 3 ans. *Enfance* 1988; 41: 139-147.
- [18] Sensimetrics Series in Human Communication: *Speech Production and Perception I*. [CD-ROM]. Edmonds, WA: Sensimetrics, 1994.
- [19] Mody M, Studdert-Kennedy M, Brady S. Speech perception deficits in poor readers: Auditory processing or phonological coding? *J Exp Child Psychol* 1997; 64: 199-231.
- [20] Dr. Speech. Version 4.20. Tiger DRS Inc., USA, 1998
- [21] Mitsyn. Software program. Microsoft Windows 3.1. DigiVox, Montreal, Canada, 1993.

- [22] PsychLab. Software. Version 1. Teren Gum, Montreal, Canada, 1992.
- [23] Raven JC. Colour Progress Matrices. London: H.K. Lewis & Co. Ltd, 1956.
- [24] Stocker RG. Temporal pattern recognition and speech perception by the hearing impaired. Unpublished thesis, McGill University, Montreal, Quebec, Canada, 1980.
- [25] Dawson PW, Busby PA, McKay CM, Clark GM. Short-term memory in children using cochlear implants and its relevance to receptive language. *J Speech Lang Hear Res* 2002; 45: 789–801.
- [26] Boothroyd A. Auditory perception of speech contrasts by subjects with sensorineural hearing loss. *J Speech Hear Res* 1984; 27: 134–144.
- [27] Boothroyd, A. Speech perception, sensorineural hearing loss, and hearing aids. In G. Studebaker & I. Hochberg (eds.), *Acoustic Factors Affecting Hearing Aid Performance*. Austin, TX: Pro Ed, 1991; 277–300.
- [28] Walden BE. Speech perception of the hearing-impaired. In J. Jerger (eds.), *Hearing Disorders in Adults*. California: College-Hill Press, 1984; 263-309.
- [29] Polen SB. Auditory event related potentials. *Semin Hear*; 1984: 5, 127-141.

Table 1.

Eight- to twelve-year-old children with hearing loss: age (years; months); age of hearing aids fitting (H/A); sex and hearing loss measured in the right ear at 250 to 8000 Hz (NT = not tested); and stimulus presentation level (dB HL).

| Subject | Age | H/A | Sex | Hearing threshold (dB HL) | | | | | | Presentation level (HL) |
|---------|-------|------|-----|---------------------------|-----|------|------|------|------|-------------------------|
| | | | | 250 | 500 | 1000 | 2000 | 4000 | 8000 | |
| 1 | 11;10 | 5;00 | M | 15 | 25 | 30 | 45 | 45 | NT | 75 |
| 2 | 9;07 | 3;00 | F | 35 | 50 | 60 | 60 | 60 | NT | 90 |
| 3 | 9;08 | 5;00 | F | 30 | 30 | 65 | 65 | 30 | 15 | 85 |
| 4 | 10;04 | 1;08 | F | 80 | 100 | 100 | 95 | 85 | 75 | 105 |
| 5 | 9;10 | 5;00 | F | 30 | 40 | 50 | 60 | 50 | NT | 85 |
| 6 | 9;11 | 4;00 | F | 40 | 40 | 45 | 50 | 45 | 30 | 85 |
| 7 | 11;0 | 2;04 | F | 30 | 40 | 45 | 70 | 90 | 75 | 85 |
| 8 | 10;0 | 2;06 | M | 65 | 80 | 90 | 90 | 95 | NT | 100 |
| 9 | 8;06 | 1;06 | F | 70 | 95 | 95 | 90 | 80 | NT | 105 |
| 10 | 9;02 | 3;00 | F | 10 | 20 | 15 | 25 | 30 | 10 | 65 |
| 11 | 8;06 | 4;00 | M | 20 | 30 | 55 | 50 | 10 | NT | 80 |
| 12 | 9;05 | 3;03 | F | 10 | 35 | 65 | 75 | 70 | 90 | 90 |
| 13 | 9;03 | 4;00 | M | 10 | 10 | 10 | 55 | 50 | NT | 70 |

Figure Captions

Figure 1. Mean number and standard deviation (bars) of correctly reproduced sequences by children with hearing loss (HL) and children with normal hearing (NH) as a function of the number of elements per sequence. Maximum number of correctly reproduced sequences is 10. Data are shown for the three pairs of stimuli: verbal syllables /a-/da/ (Va), nonverbal stimuli (NV), and verbal syllables /ba-/da/ (Vb). Verbal /a-/da/ was reproduced by 13 children with hearing loss (Va HL) and 13 with normal hearing (Va NH); nonverbal stimuli were reproduced by 10 children with hearing loss (NV HL) and 11 children with normal hearing (NV NH); and verbal /ba-/da/ was reproduced by 7 children with hearing loss (Vb HL) and 13 children with normal hearing (Vb NH).

Figure 2. Mean number and standard deviation (bars) of sequences correctly reproduced by children with hearing loss (HL) and children with normal hearing (NH) as a function of interstimulus interval (ISI) duration. Maximum number of correctly reproduced sequences is 10. Data are shown for the three pairs of stimuli: verbal syllables /a-/da/ (Va), nonverbal stimuli (NV), and verbal syllables /ba-/da/ (Vb). Verbal /a-/da/ was reproduced by 13 children with hearing loss (Va HL) and 13 with normal hearing (Va NH); nonverbal stimuli were reproduced by 10 children with hearing loss (NV HL) and 11 children with normal hearing (NV NH); and verbal /ba-/da/ was reproduced by 7 children with hearing loss (Vb HL) and 13 children with normal hearing (Vb NH).

Figure 1

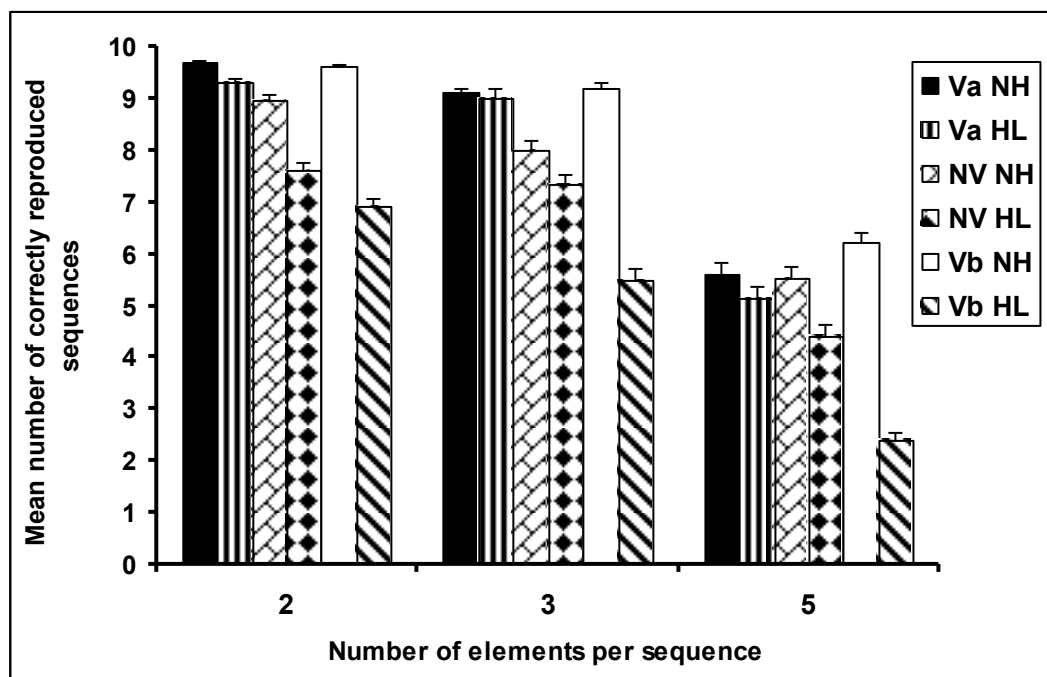
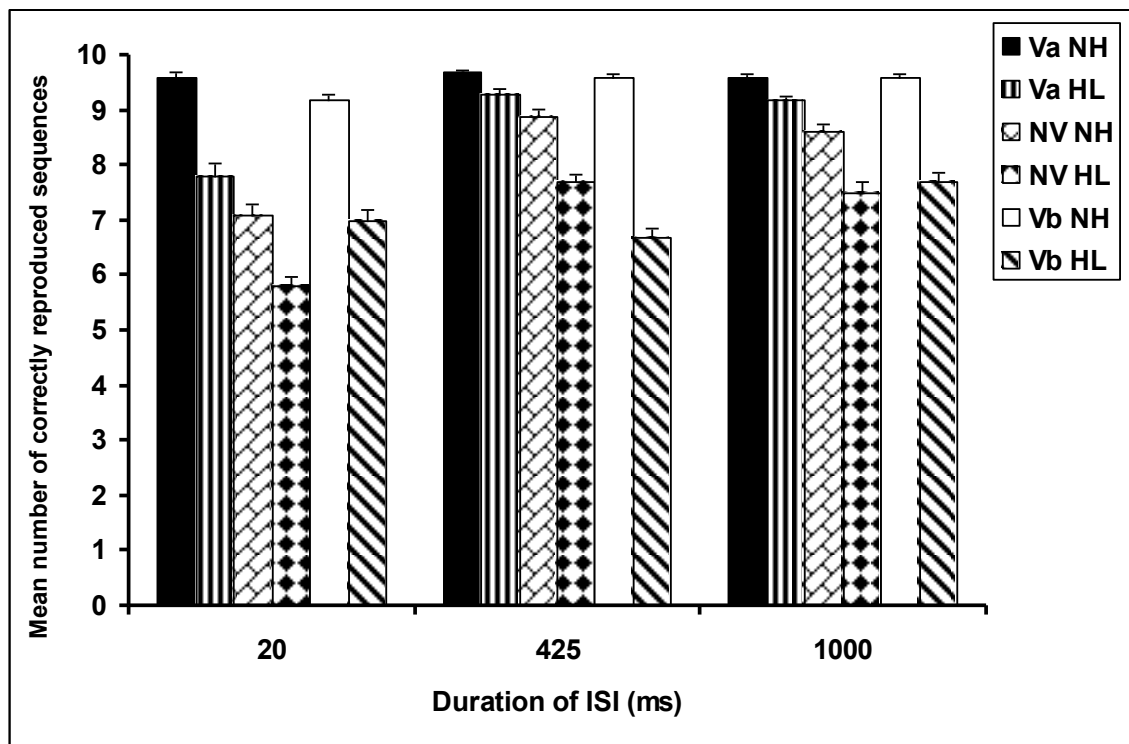


Figure 2



Annexe B

Cortical auditory evoked potentials in children with a hearing loss: A pilot study

Article soumis au

International Journal of Pediatrics, "Recent Advances in Pediatric Otolaryngology"

Koravand, A., Jutras, B. & Lassonde, M. (soumis). Cortical auditory evoked potentials in children with a hearing loss: A pilot study. *International Journal of Pediatrics*.

Cortical auditory evoked potentials in children with a hearing loss: A pilot study

Amineh Koravand^{1,2}

Benoît Jutras^{1,2}

Maryse Lassonde^{2,3}

¹ École d'orthophonie et d'audiologie, Université de Montréal, C.P. 6125, succursale Centre-ville, Montréal, Québec, Canada, H3C 3J7

² Centre de recherche du CHU Sainte-Justine, 3175 Côte Sainte-Catherine, Montréal, Québec, Canada, H3T 1C5

³ Centre de Recherche en Neuropsychologie et Cognition, Université de Montréal, C.P. 6125, succursale Centre-ville, Montréal, Québec, Canada, H3C 3J7

KEY WORDS: Peripheral hearing loss, Cortical Auditory Evoked Potentials, Mismatch Responses, auditory processing

Corresponding author :

Adresse: Amineh Koravand, Centre de recherche du CHU Sainte-Justine, 3175 Cote Sainte-Catherine, Montréal, Québec H3T 1C5

Acknowledgments

This research was funded in part by the Canadian Institutes of Health Research, *Réseau provincial de recherche en adaptation-réadaptation* (REPAR), the Research Centre of CHU Sainte-Justine, The Hearing Foundation of Canada and the Canadian Foundation for Innovation. The authors are grateful to the children and their parents who invested considerable time and effort to participate in this research project. We are very grateful to Phetsamone Vannasing, Marilène Gagnon and Manon Robert for their assistance in the present research study.

Abstract

Objective: The present study examined the patterns of neural activity in the central auditory system in children with hearing loss.

Methods: Cortical auditory evoked potentials and Mismatch Responses were recorded from ten children aged between 9 and 10 years, five with hearing loss and five without hearing loss. Electrophysiological recording was done in three passive oddball paradigms using standard and deviant verbal and non verbal acoustic stimuli.

Results: P1 and N2 components of cortical auditory evoked potentials indicate a trend toward larger P1 amplitude and a significant reduction in amplitude and latency of N2 in children with hearing loss compared to their normal-hearing peers. The former children did not display typical N1 and P2 morphologies. No significant group differences were observed for the majority of the Mismatch Responses conditions.

Conclusions: Negative Mismatch Response data suggest that the amplification provided by the hearing aids could have allowed children with hearing loss to develop adequate discriminative abilities. In contrast, the reduced auditory input affects the pattern of cortical auditory evoked potentials in children with a mild to moderately severe hearing loss. Results suggest maturational delays and/or deficits in central auditory processing in children with hearing loss.

Introduction

Sensory hearing loss often affects speech perception due to a decreased audibility of the signal as well as decreased temporal analysis ability [1,2,3]. Studies have demonstrated the influence of hearing loss on auditory temporal ordering, a task which involves the central auditory system [4,5,6]. The lower performance of children with hearing loss in some central auditory behavioral measures could be related to underlying neurophysiological deficits in central auditory functions.

Auditory neurophysiological functions have been measured in adults and children with hearing loss [7,8,9,10,11]. Sensory hearing loss in adults induced a delay in the latency of N1, N2, and a reduction in N2-P2 amplitude with respect to the components observed in normal hearing peers [8]. A study investigated the N1, N2, MMN and P3 presented at 65 and 80 dB SPL, and found a latency prolongation and an amplitude reduction of these components in adults with hearing loss compared to those of the control group at both levels of presentation [7]. However, an earlier study did not reveal any significant differences in the latencies of N1, P2 and P3 components between adults with hearing loss and their normal-hearing controls [11]. Several factors could account for these differential findings, such as participants' age, age at onset of hearing loss, type and/or degree of hearing loss, level of stimulus presentation and the type of stimuli used.

In children, latency changes in the cortical auditory evoked potentials (CAEPs) have been used to document auditory system plasticity and recovery from auditory deprivation following cochlear implantation. Congenitally deaf children who are fitted with cochlear implants during a sensitive period of early childhood show normal

central auditory maturation within six months of implant use as demonstrated by changes in P1 latency [10,12]. Interestingly, in children with sensory hearing loss and those with auditory neuropathy, the P1, N1 and P2 waveforms are present only in those children exhibiting good speech perception skills [9]. However, the children with and without good speech perception skills were not age-matched and this factor could have influenced the results, since CAEPs show substantial changes with maturation [13,14].

To determine CAEPs's potential clinical benefits in assessing central auditory functions in children with hearing loss, a clear understanding of the effects of a sensory hearing loss on CAEPs is needed. The present study examines the patterns of neural activity in the central auditory system in children with hearing loss wearing hearing aids.

Materials and Methods

Participants

Two groups of nine to ten years old female children participated in the study: five with sensory hearing loss (mean age: 9:10 years, SD = ± 3 mo) and five with normal hearing (mean age: 9:11 years, SD = ± 3 mo). Participants with normal hearing had auditory detection threshold at 15 dB HL or less between 500 Hz and 8 kHz, bilaterally (re: ANSI, 1996 [15]). Average hearing sensitivity thresholds of children with hearing loss, based on the average of 500, 1000, and 2000 Hz thresholds, were within the limits of mild to moderately severe hearing loss (according to Clark (1981)'s classifications [16]). All participants were right handed, as measured by an adapted protocol to assess

laterality dominance [17]. The study was approved by the Ethics Committee of the Sainte-Justine Hospital.

Insert Table 1

Stimuli

Three pairs of stimuli were used for this study: verbal stimuli (/ba/ and /da/), nonverbal stimuli (acoustic transformation of /ba/ and /da/) and nonverbal acoustic stimuli (a 1 kHz pure-tone and a wide band noise). Using simple and complex nonverbal stimuli can provide information regarding how the brain processes these different types of stimuli in children with sensory hearing loss. Furthermore, the use of verbal stimuli can provide valuable information on their speech processing abilities. The verbal pair consisted of two synthetic syllables: /ba/-/da/, which were composed of three formants, sharing the same frequencies for the first formant transition between the consonant and the vowel. The second formant transition for /ba/ starts at 953 Hz and finishes at 1302 Hz, the second formant transition for /da/ starts at 1575 Hz and finishes at 1302. The third formant of /ba/ and /da/ shares almost the same acoustical features; for the syllables /ba/, the formant transition between the consonant and the vowel starts at 2584 Hz and finishes at 2510 Hz, for the syllables /da/, it starts at 2586 Hz and it finishes at 2510. Stimuli were selected from the CD-ROM *Speech Production and Perception I* [18].

The first pair of nonverbal stimuli consisted of synthesized transformations of the verbal stimuli /ba/-/da/, each composed of two sine waves identical to those of the

centre frequencies of the second and third formant frequencies in the synthetic /ba/-/da/ [19]. However, they differed perceptually from their corresponding speech sounds. Nonverbal stimuli were generated using two softwares [20,21]. The second pair of stimuli was the pair of nonverbal acoustic stimuli, a 1 kHz pure-tone and a wide band noise [4]. Verbal and nonverbal stimuli were 250 ms in duration with 2.2 ms rise and fall times.

The stimuli were presented with a computer (*DELL*) using Stimaudio (NeuroScan Inc.) and the *Stim*² software. The stimulus intensity was controlled by an audiometer (Interacoustics, AD229b model). Stimuli were presented through insert- earphone (E-A-RTONE 3A) to the right ear at 70 dB HL for children with normal hearing and between 85 and 105 dB HL for those with hearing loss (See Table 1). The stimuli were presented in a passive oddball paradigm, with standard stimuli (syllable /ba/, nonverbal /ba/ and a 1 kHz Pure tone) of 85% probability of occurrence and deviant stimuli (syllable /da/, nonverbal /da/ and wide band noise respectively) with a 15% probability of occurrence. The interstimulus interval (ISI) was one second. The order of stimulus presentation was pseudo-randomized within a run, with no two deviants occurring in succession and no run beginning with a deviant stimulus. Any deviant stimulus was always preceded by at least three standard stimuli. A thousand counterbalanced trials for each pair of stimuli were recorded.

Electrophysiological recordings

The cortical responses were digitally recorded using a high-density system, Scan 4.0 software (NeuroScan, Inc., USA), with SynAmps amplifiers and from 128 Ag/AgCl

electrodes. Electrophysiological signals were acquired at a sampling rate of 250 Hz, with an analog on-line band-pass filtering from 0.1 to 100 Hz using the SynAmps amplifiers running on a *Dell* computer. An electrode located on the forehead (Fpz) served as ground and reference was located at the vertex. Electrode impedance was kept under 7 k Ω for mastoid, central and frontal regions and below 15 k Ω for ocular and peripheral regions, which is within the recommended range for this system. (SynAmps).

Procedure

Prior to testing, the purpose of the study was explained to the participant and their parents. The parents of all participants were asked to read and sign a consent form. The children also gave their assent to participate in the study. During the experimental procedures, the child was seated in a comfortable chair in a double-walled sound-proof booth. Participants were monitored through an infrared camera equipped with an integrated speaker, allowing them to communicate at any time with the experimenters located in an adjacent room. Participants watched a movie or cartoon of their choice on a computer monitor (View Sonic Professional Series P225F) with the sound off. They were told to ignore the auditory input and to focus their attention on the movie as they were going to be asked detailed questions about it. Total testing duration was approximately between 90 and 120 minutes; travelling expenses were compensated.

Data analysis

Multiple analyses were performed on the electrophysiological data before obtaining the corresponding evoked potentials by using the BrainVision Analyser program (Brain products, Munich, Germany) on an IBM computer. The data were corrected for eye movements using Gratton & Coles' algorithm [22]. The data were next digitally filtered using a band-pass filter of 1–15 Hz at 24 dB/octave. The filtered data were re-referenced to both left and right mastoids electrodes. Eye movements and epochs with other artefacts were rejected based on voltage criteria ($\pm 100 \mu\text{V}$ for all channels) and EEG was visually inspected to assure adequate artefact rejection. The timeframe of analysis included a pre-stimulus baseline of 100 msec and 700 msec post stimulus presentation. The data were baseline corrected to -50 ms. The ERPs were averaged separately for each stimulus: standard and deviant. Auditory cortical components were defined as followed: P1 was the first positive waveform in the time window of 50-100 ms. The N1 was defined as the first negativity occurring after the P1 response in the time window of 80-120 ms. An additional criterion for the identification of the N1 component was the presence of a positive peak following the negativity, defined as P2 within the time window of 100-160 ms. The N2 was the second negative peak at around 200-280 ms. Latency and amplitude values were determined for each component (P1, N1, P2 and N2) when present for the three stimulus pairs. Amplitude values were measured from baseline to peak for each component, and latency values were measured relative to the onset of stimulus presentation.

Regarding the Mismatch responses (MMRs), they were computed according to the following procedure: ERPs evoked by a standard stimulus (syllable /ba/, nonverbal /ba/ and 1 kHz Pure tone) were subtracted from ERPs evoked by the presentation of a

deviant stimulus (syllable /da/, nonverbal /da/ and wide band noise, respectively) for each participant. Responses to standard stimuli that immediately followed the presentation of deviant stimuli were excluded from the standard stimulus average as different brain activation could have resulted from the dynamic formation of a new memory trace. Two regions of activities were observed with the pair 1 kHz Pure tone and wide band noise; 1) a first negative peak (originated from N1-N2 region) was measured from 115 to 200 ms and 2) a second positive slope (N2 to P3) was observed from 200 to 330 ms. However, only one prevalent response was observed with the nonverbal and verbal pairs, from 115 to 260 ms which was in the N1-N2 region. The latency of the most negative and/or positive peaks was measured for the MMRs by using a peak amplitude detection manipulation performed for each participant.

Results

CAEP components

CAEP components were present with standard and deviant stimuli in all children with the three stimulus pairs. Statistical analyses were conducted with the amplitude and latency values on the standard sound waveforms since they were more well-defined and had a clearer morphology compared to those obtained from deviant waveforms.

Morphology

Four main components of CAEPs, P1, N1, P2 and N2, were observed clearly in children with normal hearing with the three stimuli (syllable /ba/, nonverbal /ba/ and 1 kHz Pure tone) (Figure 1). The morphology of the four components was affected by the

stimulus type. The components were formed more clearly with less complex stimuli (1 kHz) compared to other complex stimuli (verbal syllable and its acoustic transformation). Moreover, the N1 and P2 components were not well identified in some children with hearing loss (Figure 1). Therefore, results with the P1 and N2 components, which were clearly identified in all participants, were analyzed.

Insert Figure 1

Latency and amplitude of the P1 and N2 components

Figures 2 and 3 display the latency and amplitude values of the P1 and N2 components in the two groups of children with the three stimuli used in the study.

Insert Figure 2 and 3

Using SPSS software, a two-way ANOVA was performed (Group, Stimulus type) with repeated measures on the second factor, for both the latency and amplitude measures of P1 and N2.

Latency – With regard to P1 latency, results revealed a significant effect only for the main Type factor (verbal /ba/, nonverbal /ba/ and 1kHz Pure tone) [$F(2, 16) = 7.85, p < .01$]. No significant effect was observed for the Group factor: (children with normal hearing and children with hearing loss) [$F(1, 8) = 2.5, p = .15$]; nor for the two-way interaction Group x Type [$F(2, 16) = 0.33, p = .72$]. T tests were conducted for the significant Type factor. Bonferroni corrections were applied to adjust for multiple

comparisons ($p < .016$). Results revealed a significant difference between the verbal /ba/ and the 1 kHz Pure tone [$t(9) = 3.2, p < .016$] and between the nonverbal /ba/ and the 1 kHz Pure tone [$t(9) = 3.95, p < .016$]. There was no significant difference between verbal and nonverbal /ba/ [$t(9) = .25, p = .81$].

As pertains to N2 latency, results revealed a significant effect of the two main factors: Group [$F(1, 8) = 9.01, p < .01$] and Type [$F(2, 16) = 3.9, p < .05$]. However no significant effect was observed for the two way interaction Group x Type [$F(2, 16) = 2.4, p = .12$]. T tests were conducted for the significant Type factor. Bonferroni corrections were applied to adjust for multiple comparisons ($p < .016$). No significant difference was observed between the verbal /ba/ and the 1 kHz Pure tone [$t(9) = 2.2, p = .05$]; between the nonverbal /ba/ and the 1 kHz Pure tone [$t(9) = 1.9, p = .09$] nor between verbal and nonverbal /ba/ [$t(9) = 1.2, p = .24$].

Amplitude – Regarding P1 amplitude, results revealed a significant effect for the Type factor only [$F(2, 16) = 5.5, p < .01$]. The main Group factor failed to reach significance but a trend was observed [$F(1, 8) = 4.03, p = .08$]. No significant effect was obtained for the two-way interaction Group x Type [$F(2, 16) = .6, p = .58$]. T tests were conducted for the significant Type factor. Bonferroni corrections were applied to adjust for multiple comparisons ($p < .016$). Results revealed a significant difference between the nonverbal /ba/ and the 1 kHz Pure tone [$t(9) = 3, p < .016$]. There was no significant difference between verbal and nonverbal /ba/ [$t(9) = 2.25, p = .05$] nor between the verbal /ba/ and the 1 kHz Pure tone [$t(9) = 0.62, p = .55$].

For the N2 amplitude, results showed significant effects for the two main factors: Group [$F(1, 8) = 5.8, p < .05$]; Type [$F(2, 16) = 3.8, p < .05$] but the two-way interaction Group x Type was not significant [$F(2, 16) = 0.06, p = .94$]. T tests were conducted for the significant Type factor. Bonferroni corrections were applied to adjust for multiple comparisons ($p < .016$). Results revealed a significant difference between the verbal /ba/ and the 1 kHz Pure tone only [$t(9) = 3.1, p < .016$]. There was no significant difference between verbal and nonverbal /ba/ [$t(9) = 1.2, p = .25$] nor between the nonverbal /ba/ and the 1 kHz Pure tone [$t(9) = 1.6, p = .14$].

Mismatch responses (MMRs)

Figure 4 displays the grand average of standard responses, deviant responses and MMRs in the two groups of children with the three pairs of stimuli used in the study. A two-way ANOVA was performed (Group, Stimulus type) with repeated measures on the second factor, for both the latency and amplitude measures of the negative MMR. Figures 5 and 6 display the amplitude and latency values of the negative MMN in the two groups of children with the three pairs of stimuli used in the study.

Insert Figure 4

Latency – With regard to negative MMR latency, results revealed a significant effect only for the main Type factor (verbal /ba/-/da/ pair, nonverbal /ba/-/da/ pair and 1 kHz Pure tone and wide band noise pair) [$F(2, 16) = 23.3, p < .001$]. No significant effect was observed for Group factor: (children with normal hearing and children with

hearing loss) [$F(1, 8) = 1.6, p = .27$]; nor for the two-way interaction Group x Type [$F(2, 16) = 1.93, p = .18$].

A T test was conducted for the significant Type factor. Bonferroni corrections were applied to adjust for multiple comparisons ($p < .016$). Results revealed a significant difference between the verbal /ba-/da/ pair and the 1 kHz Pure tone and wide band noise pair [$t(9) = 6.9, p < .016$] and between verbal and nonverbal /ba-/da/ pairs [$t(9) = 4.3, p < .016$]. There was no significant difference between the nonverbal /ba-/da/ pair and the 1 kHz Pure tone and wide band noise pair [$t(9) = 2.08, p = .07$].

3.2.2. Amplitude – Regarding the negative MMR amplitude, results revealed no significant effect for the two main factors; Type [$F(2, 16) = .48, p = .63$], Group factor [$F(1, 8) = .1, p = .83$] nor for the two-way interaction Group x Type [$F(2, 16) = 0.1, p = .99$].

A positive MMR component was observed with the pair of 1 kHz Pure tone and wide band noise (Figure 4). A T-test was conducted on the amplitude and latency values. Results revealed a significant difference between the two groups only for the amplitude value [$t(8) = 1.8, p < .05$]. There was no significant difference between the two groups for the latency value [$t(8) = .53, p = .23$] (Figure 7).

Insert Figure 5, 6, 7

Discussion

The aim of the present research was to study the patterns of the neurophysiological activity in the central auditory system in children with hearing loss as compared to

children with normal hearing. Differential findings were observed with regard to the principal cortical components and the MMR results and these will be discussed separately in the following sections.

Cortical principal components

Regarding the cortical principal components, P1, N1, P2 and N2, their response patterns differed between the two groups. Regardless of stimulus type, the main findings revealed that P1 amplitude tended to be larger, N1 and P2 components less defined and amplitude and latency of N2 reduced in children with hearing loss compared to the results of the children with normal hearing. These findings will be discussed according to three factors: the presentation level, the maturation of the central auditory system and a deficit in the central auditory system.

Presentation level

The stimuli were presented between 80 and 105 dB HL for the children with hearing loss and at 70 dB HL for the children with normal hearing. The higher level of stimulus presentation (in dB HL) could have contributed to the large amplitude of P1 and to the shorter latency of N2. A study found that the amplitude of the early auditory principal component, N1, and the cognitive component P300 was larger and their latency shorter at 80 dB SPL compared to 65 dB SPL in adults with hearing loss [7]. As the intensity increases, peak latencies of principal components (P1, N1, P2 and N2) decrease and their peak amplitude increase in normal hearing adults [23].

However, in the present study, the higher intensity did not seem to affect the P1 latency and the N2 amplitude as it did with the P1 amplitude and the N2 latency in children with hearing loss. In fact, if the presentation level played a role, a reduction of the P1 latency and an increment in N2 amplitude would have been expected in children with hearing loss compared to their normal hearing peers. Results indicate that this was not the case. While it remains possible that levels of presentation can affect central auditory components, the finding that different patterns of results were observed for P1 and N2 otherwise reinforces the notion that these two components have different neural generators.

Maturation of the central auditory system

Regarding the maturation of the central auditory system, in children with normal hearing, auditory late latency evoked potentials change dramatically in morphology, latency and amplitude with age [13,14,24,25]. Hence, children should be matched with caution on the basis of age.

The P1 waveform changes in a complex manner in children. P1 decreases systematically in latency and/or amplitude to reach adult values almost at the age of 14-15 years [26] or 20 years [25]. The maturation of CAEPs has been investigated in children who received their cochlear implant between 18 months and six years of age, with the average age of implantation being 4.5 years [26]. The CAEPs, and in particular, the peak latency of P1, appeared to mature at the same rate as in children with normal hearing but was approximately delayed by the corresponding length of auditory deprivation [26]. This finding emphasizes that once adequate auditory

stimulation is provided, the central auditory pathway continues to develop, but it is delayed by the duration of deafness, suggesting a limited form of auditory plasticity. Other studies further suggest that the plasticity of central auditory pathways is maximal only for a restricted period of about 3.5 years in early childhood [10,12]. If the hearing system is stimulated within that period, the P1 morphology and latency reach age-normal values within 3 to 6 months following the beginning of auditory stimulation. By contrast, if the auditory system does not receive adequate stimulation for more than 7 years, then most children exhibit a delayed P1 latency and an abnormal large P1, even after years of implant use [10,12].

In the present study, all children with hearing loss experienced a period without any stimulation with hearing aids, since their hearing loss was identified between the age of 20 months and 5 years (Table 1). During this period of deprivation, the maturation of the central auditory nervous system could have been slowed down and the large P1 observed in children with hearing loss could be the reflection of limited plasticity. However, the amplification provided by the hearing aids could have certainly contributes to get under way the maturational processes, but it might not be sufficient to supply entirely the effect of the auditory deprivation. Although a study found that the major CAEPs peaks in children with hearing loss were similar to those of children with normal hearing; the children were not well matched for their age [9]. Moreover, the examination of data suggests that P1 amplitude was larger and P1 latency was delayed for verbal stimuli in children with hearing loss compared to their normal peers [9], a pattern of results partly similar to the one found in the present study.

Two out of four cortical auditory potential components – N1 and P2 – were less defined in children with hearing loss compared to their peers with normal hearing. These two components do not emerge consistently until the age of 8 to 11 years in children with normal hearing [13,24,26]. The absence of these peaks or their affected morphology in children with hearing loss could be another manifestation of a delayed maturation of the central auditory nervous system. This interpretation is consistent with a study reporting that N1 and P2 are either delayed in developing or absent in children with a cochlear implant [26].

Regarding the N2 maturation in children with normal hearing, N2 amplitude has an initial increase between the age of 5 to 11 years [24] followed by a gradual decline from late childhood to mid adolescence [27,28] and finally N2 amplitude reaches adult values by age 17 [24]. However, there is no general consensus regarding the development of peak latency, with some studies showing a decline [29], no change [27] or an increase in latency with age [24]. The maturation effect was examined at central (Cz, C3 and C4) and at frontal (Fz) electrodes in 118 subjects [24]. The N2 latency increased significantly as a function of age at central electrodes with no maturational change at the frontal electrode. However, for the children between 9 and 10 years old, the latency values were similar at the four electrode sites [24]. Based on this study [24], the reduction in amplitude and in latency of N2 in children with hearing loss in the present set of data could be explained by a delay in maturation of the central auditory nervous system. Alternately, based on other studies (ex: [13,29]), the reduction of N2 latency could be related to a more mature system. However, it seems counter-intuitive that the late component (N2) should mature more rapidly in children with hearing loss

than in children with normal hearing. Taking into account the increased P1 amplitude and the abnormal morphology of N1 and P2, the N2 changes would rather militate in favor of delayed maturation in children with hearing loss.

Deficit in the central auditory system

The greater amplitude of P1 with a concomitant reduction in N2 amplitude and the less well defined N1-P2 components could also indicate a deficit in central auditory processing. The anomalies have been reported in central auditory late latency components in children with language-based learning problems (LP) [30]. Albeit displaying normal hearing sensitivity, these children had abnormalities in neurophysiological encoding marked by different patterns in amplitude or latency compared to their control peers. In fact, one normal category and three atypical categories based on cortical responses of children with LP were found. The atypical category 1 included children with a delayed P1 latency and no evidence of N1 or P2 component. The atypical category 2 was composed of children having normal P1 but delayed N1 and P2 responses. For the atypical category 3, children had generally low amplitude responses [30]. Although N2 properties were not specifically examined in this study, observations from their results suggest that N2 amplitude and latency values were abnormal (low amplitude and/or delayed latency) for children in the three atypical categories. These atypical responses might represent a general decrease in synchronous activity, indicating an immature development of the central auditory pathways or slower processing mechanisms [30].

In sum, the interaction and the combination of at least the three mentioned factors could contribute to the pattern of results obtained in children with hearing loss. The role and the degree of contribution of each of these factors on the cortical components in children with hearing loss remain to be clarified.

Mismatch responses

Similar patterns of results were obtained in the two groups of children with the negative Mismatch response measured in the 150-200 ms window. These results suggest that the auditory system can discriminate sounds, be they verbal or nonverbal, and that this pattern of discrimination can be found in children with hearing loss as well as in children with normal hearing. They further suggest that the amplification provided by the hearing aids could have contributed to get under way the maturational processes, allowing the children to develop adequate discriminative abilities.

A positive MMR was measured in the 200-300 ms window with the pair of 1 kHz Pure tone and wide band noise only. Results showed that the amplitude of this positive MMR was significantly smaller in children with hearing loss than that observed in children without hearing loss. This result may simply be related to the fact that children with hearing loss have, as stated above, a smaller N2 amplitude in response to the standard stimuli compared to normal hearing children.

The negative MMR was also found to differ according to stimulus type. When the stimuli were simple, (the pair 1 kHz and wide band noise), the MMR had an earlier latency compared to more complex stimuli, such as the nonverbal and verbal /ba/-/da/.

The effect of stimulus type on ERP results has also been reported by other studies [31,32]. Those and the present results confirm that simple stimuli are more rapidly processed within the central auditory system in comparison to complex stimuli.

Conclusion and Clinical implications

Although obtained in a limited number of children and in a restricted age range, these preliminary findings indicate that CAEPs can be more sensitive markers of the effects of sensory hearing loss than are Mismatch responses. Specific patterns of CAEPs in children with a mild to moderately severe hearing loss were observed, suggesting that reduced auditory input early in life has an impact on the development of central auditory functions. The data further indicate that sensory hearing loss affects differently the earlier cortical component P1 compared to the later component N2. Measuring P1 and N2, as the neurophysiological markers in children with hearing loss, can provide an objective assessment of the maturation of their central auditory system. P1 and N2 amplitude measured before and after a given auditory training program may reflect the efficiency of the program and confirm the plasticity of the auditory pathways. Also, with these two neurophysiological components, audiologists may determine whether appropriate stimulation is being provided by a hearing aid or cochlear implant, and based on the findings, they may adjust the auditory training program.

References

- [1] Boothroyd A: Speech perception, sensorineural hearing loss, and hearing aids. In G. Studebaker & I. Hochberg (Eds.), *Acoustical Factors Affecting Hearing Aid Performance* Austin, TX: Pro Ed, 1993, pp 277-300.
- [2] Nelson, P-B, Dwyer Thomas, S: Gap detection as a function of stimulus loudness for listeners with and without hearing loss. *J Speech, Lang Hear Res* 1997; 40 :1387-1394.
- [3] Walden, B-E: Speech perception of the hearing-impaired. In J. Jerger (Ed.), *Hearing disorders in adults*. California: College-Hill Press, 1984, pp 263-309.
- [4] Jutras, B, Gagné, J-P : Auditory sequential organization among children with and without a hearing loss. *J Speech, Lang Hear Res* 1999; 42: 553-567.
- [5] Koravand, A, Jutras, B, Roumy, N : Peripheral hearing loss and auditory temporal-ordering ability in children. *Int J Pediatr Otorhinolaryngo*. 2010; 74: 50-55.
- [6] Rose, M-M, Moore, B-C-J: Perceptual grouping of tone sequences by normally hearing and hearing impaired listeners. *J Acoust Soc Am* 1997;102: 1768-1778.
- [7] Oates, P-A, Kurtzberg, D, Stapells, D-R: Effects of sensorineural hearing loss on

cortical event-related potential and behavioral measures of speech-sound processing. *Ear Hear* 2002; 23: 399-415.

[8] Polen, S-B: Auditory event related potentials. *Semin Hear* 1984; 5: 127-141.

[9] Rance, G, Cone-Wesson, B, Wunderlich, J, Dowell, R: Speech perception and cortical event related potentials in children with AN. *Ear Hear* 2002; 23: 239-253.

[10] Sharma, A, Dorman, M-F, Kral, A: The influence of a sensitive period on central auditory development in children with unilateral and bilateral cochlear implants. *Hear Res* 2005; 203: 134-143.

[11] Wall, L-G, Dalebout, S-D, Davidson, S-A, Fox, R-A : Effect of hearing impairment on event-related potentials for tone and speech distinctions. *Folia Phoniatr* 1991; 43: 265-274.

[12] Sharma, A, Dorman, M-F, Spahr, A: A sensitive period for the development of the central auditory system in children with cochlear implants: implications for age of implantation. *Ear Hear* 2002; 23: 532-539.

[13] Sussman, E, Steinschneider, M, Gumenyuk, V, Grushko, J, Lawson, K: The maturation of human evoked brain potentials to sounds presented at different stimulus rates. *Hear Res* 2008; 236: 61-79.

- [14] Lippé, S, Martinez-Montes, E, Arcand, C, Lassonde, M : Electrophysiological study of auditory development. *Neuroscience* 2009; 164: 1108-18
- [15] ANSI- American National Standard Institute: *American National Standard Specifications for Audiometers*. 1996; New York : USA Standard.
- [16] Clark, J.G., 1981. Uses and abuses of hearing loss classification. *ASHA*. 23, 493-500.
- [17] De Agostini, M, Dellatolas, G : Une épreuve simple pour évaluer la préférence manuelle chez l'enfant à partir de 3 ans. *Enfance* 1988; 41: 139-147.
- [18] Sensimetrics Series in Human Communication: Speech Production and Perception I. (CD-ROM), 1994, Edmonds, WA: Sensimetrics.
- [19] Mody, M, Studdert-Kennedy, M, Brady, S: Speech perception deficits in poor readers: Auditory processing or phonological coding? *J Exp Child Psychol*. 1997; 64: 199-231.
- [20] Dr Speech: Version, 4, 20. Tiger DRS inc. 1998; United States of America.

[21] Mitsyn,: Software program. Microsoft Windows 3.1. DigiVox, 1993, Montréal, Québec, Canada.

[22] Gratton, G, Coles, M-G, Donchin, E : A new method for off-line removal of ocular artifact. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol* 1983 ; 55: 468-484.

[23] Billings, C-J, Tremblay, K-L, Souza, P-E, Binns, M-A: Effects of hearing aid amplification and stimulus intensity on cortical auditory evoked potentials, *Audiol Neurotol* 2007; 12: 234–246.

[24] Ponton, C, Eggermont, J-J, Kwong, B, Don, M: Maturation of human central auditory system activity: evidence from multi-channel evoked potentials. *Clin Neurophysiol.* 2000;111: 220-236.

[25] Sharma, A, Kraus, N, McGee, T-J, Nicol, T-G: Developmental changes in P1 and N1 central auditory responses elicited by consonant-vowel syllables. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol.* 1997;104 : 540-545.

[26] Ponton, C, Don, M, Eggermont, J-J, Waring, M-D, Masuda, A: Maturation of human cortical auditory function: differences between normal-hearing children and children with cochlear implants. *Ear Hear* 1996; 17: 430-437.

- [27] Johnstone, S-J, Barry, R-J, Anderson, J-W, Coyle, S-F : Age related changes in child and adolescent event-related potential component morphology, amplitude and latency to standard and target stimuli in an auditory oddball task. *Int. J. Psychophysiol* 1996; 24: 223-238.
- [28] Ceponiene R, Rinne T, Näätänen, R: Maturation of cortical sound processing as indexed by event-related potentials. *Clin Neurophysiol* 2002; 113: 870-882.
- [29] Cunningham, J, Nicol, T, Zecker, S, Kraus, N: Speech-evoked neurophysiologic responses in children with learning problems: development and behavioral correlates of perception, *Ear Hearing* 2000; 21: 554–568.
- [30] Gilley, Ph-M, Sharma, A, Dorman, M, Martin, K : Abnormalities in central auditory maturation in children with language-based learning problems. *Clin Neurophysiol* 2006; 117: 1949-1956.
- [31] Uwer, R, Albrecht, R, von Suchodoletz, W: Automatic processing of tones and speech stimuli in children with specific language impairment. *Dev Med Child Neurol* 2002; 44: 527-532.
- [32] Sebastian, C, Yasin, I: Speech versus tone processing in compensated dyslexia: Discrimination and lateralization with a dichotic Mismatch Negativity (MMN) paradigm. *Int. J. Psychophysiol* 2008; 70: 115-126.

Table 1.

Data of nine- to ten-year-old children with hearing loss: age (years; months); age of hearing aids fitting (H/A); sex and hearing loss measured in the right ear at 250 to 8000 Hz (NT = not tested); and stimulus presentation level (dB HL).

| Participant | Age | H/A | Sex | Hearing threshold (dB HL) | | | | | | Presentation level (HL) |
|-------------|-------|------|-----|---------------------------|-----|------|------|------|------|-------------------------|
| | | | | 250 | 500 | 1000 | 2000 | 4000 | 8000 | |
| 1 | 9;07 | 3;00 | F | 35 | 50 | 60 | 60 | 60 | NT | 90 |
| 2 | 9;08 | 5;00 | F | 30 | 30 | 65 | 65 | 30 | 15 | 85 |
| 3 | 10;04 | 1;08 | F | 80 | 100 | 100 | 95 | 85 | 75 | 105 |
| 4 | 9;10 | 5;00 | F | 30 | 40 | 50 | 60 | 50 | NT | 85 |
| 5 | 9;11 | 4;00 | F | 40 | 40 | 45 | 50 | 45 | 30 | 85 |

Figure Captions

Figure 1. Waveforms recorded at FCz electrode from five children with normal hearing – NH (solid line) and five with hearing loss – HL (dashed line) with 1 kHz pure tone (top), nonverbal /ba/ (middle) and /ba/ (bottom) stimuli.

Figure 2. P1 and N2 mean latency values and standard deviation recorded of five children with hearing loss (HL) and five children with normal hearing (NH) with 1 kHz pure tone (T), nonverbal /ba/ (NV) and verbal /ba/ (V) stimuli.

Figure 3. P1 and N2 mean amplitude values and standard deviation of five children with hearing loss (HL) and five children with normal hearing (NH) with 1 kHz pure tone (T), nonverbal /ba/ (NV) and verbal /ba/ (V) stimuli.

Figure 4. The grand average ERPs of five children with normal hearing (NH) and the five children with hearing loss (HL), elicited by the standard stimuli (solid lines): 1 kHz pure tone (top), nonverbal /ba/ (middle) and /ba/ (bottom); by the deviant stimuli (dotted lines): wide band noise (top), nonverbal /da/ (middle) and /da/ (bottom). The Mismatch Response (MMR) is represented by a bold dashed line.

Figure 5. The latency value and standard deviation (bars) of the negative MMR, recorded from five children with hearing loss (HL) and five children with normal hearing (NH) are presented for the three stimulus pairs; Tone (1 kHz Pure tone and wide band noise), NV (nonverbal /ba/-/da/) and Verbal (/ba/-/da/).

Figure 6. The amplitude value of the negative MMR, recorded from five children with hearing loss (HL) and five children with normal hearing (NH) is shown for the three pairs of stimuli; Tone (1kHz Pure tone and wide band noise), NV (nonverbal /ba/-/da/) and Verbal (/ba/-/da/).

Figure 7. The latency, amplitude value and standard deviation (bars) of the positive MMR, recorded with the pair 1kHz Pure tone and wide band noise from five children with hearing loss (HL) and five children with normal hearing (NH).

Figure 1

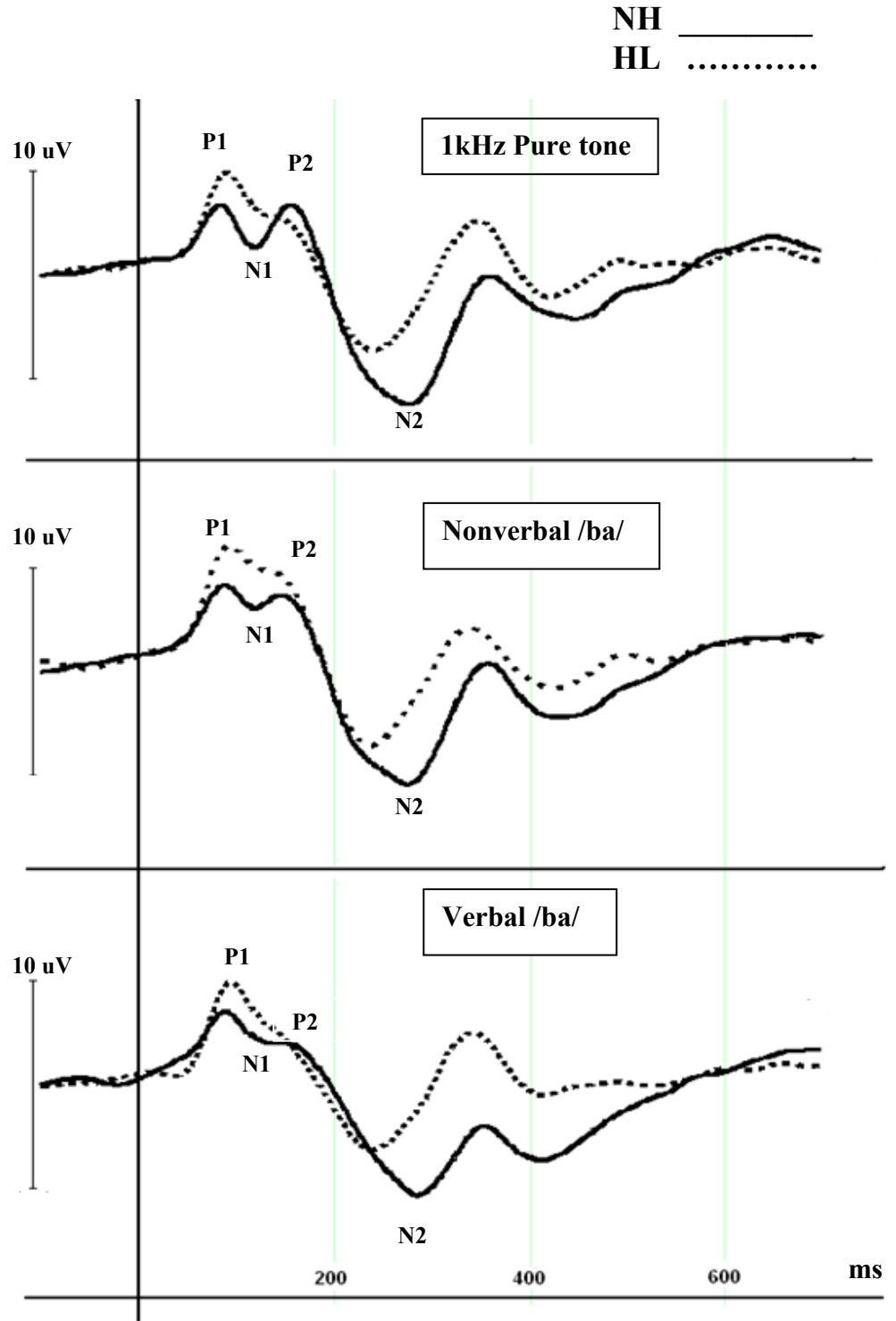


Figure 2

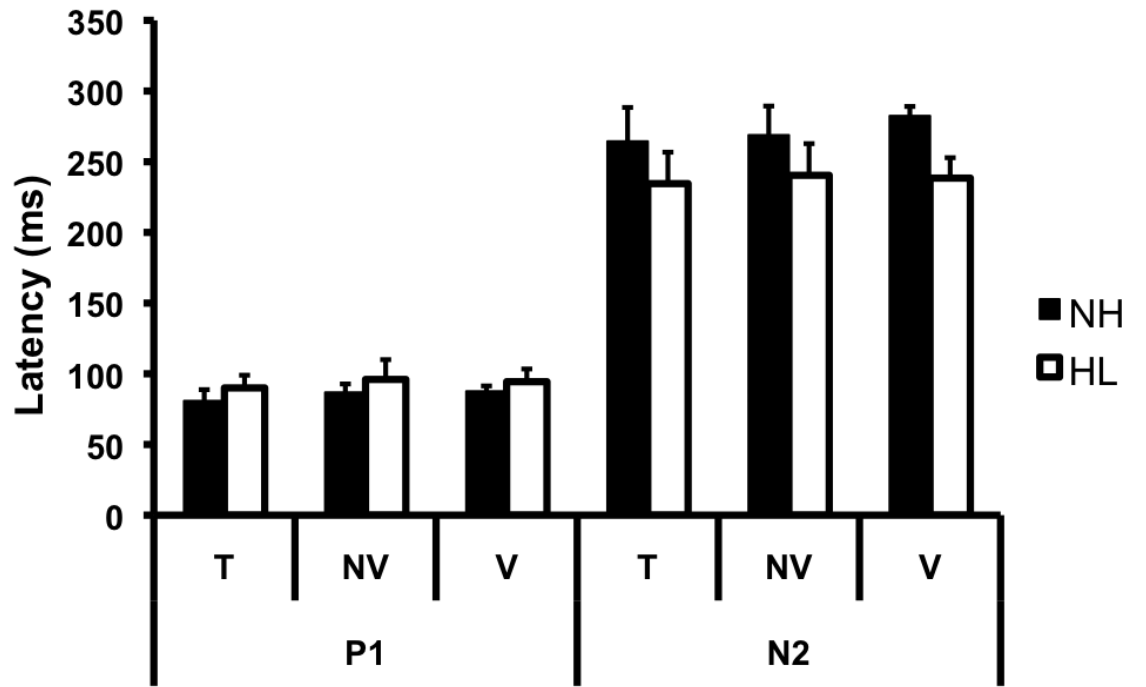


Figure 3

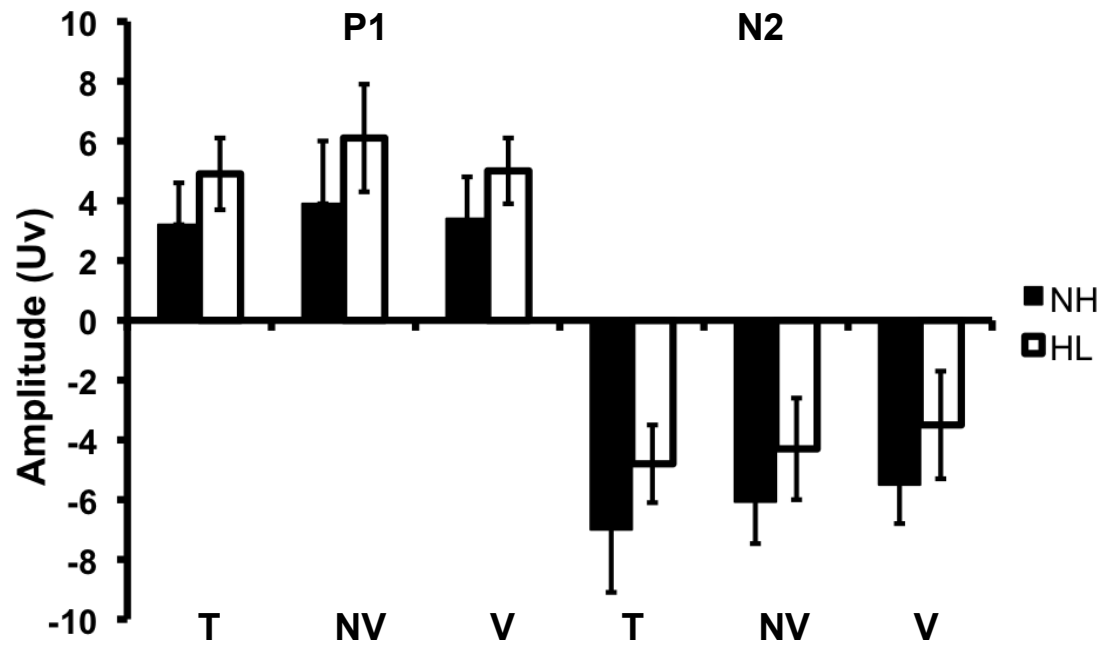


Figure 4

Standard _____
Deviant
MMR -----

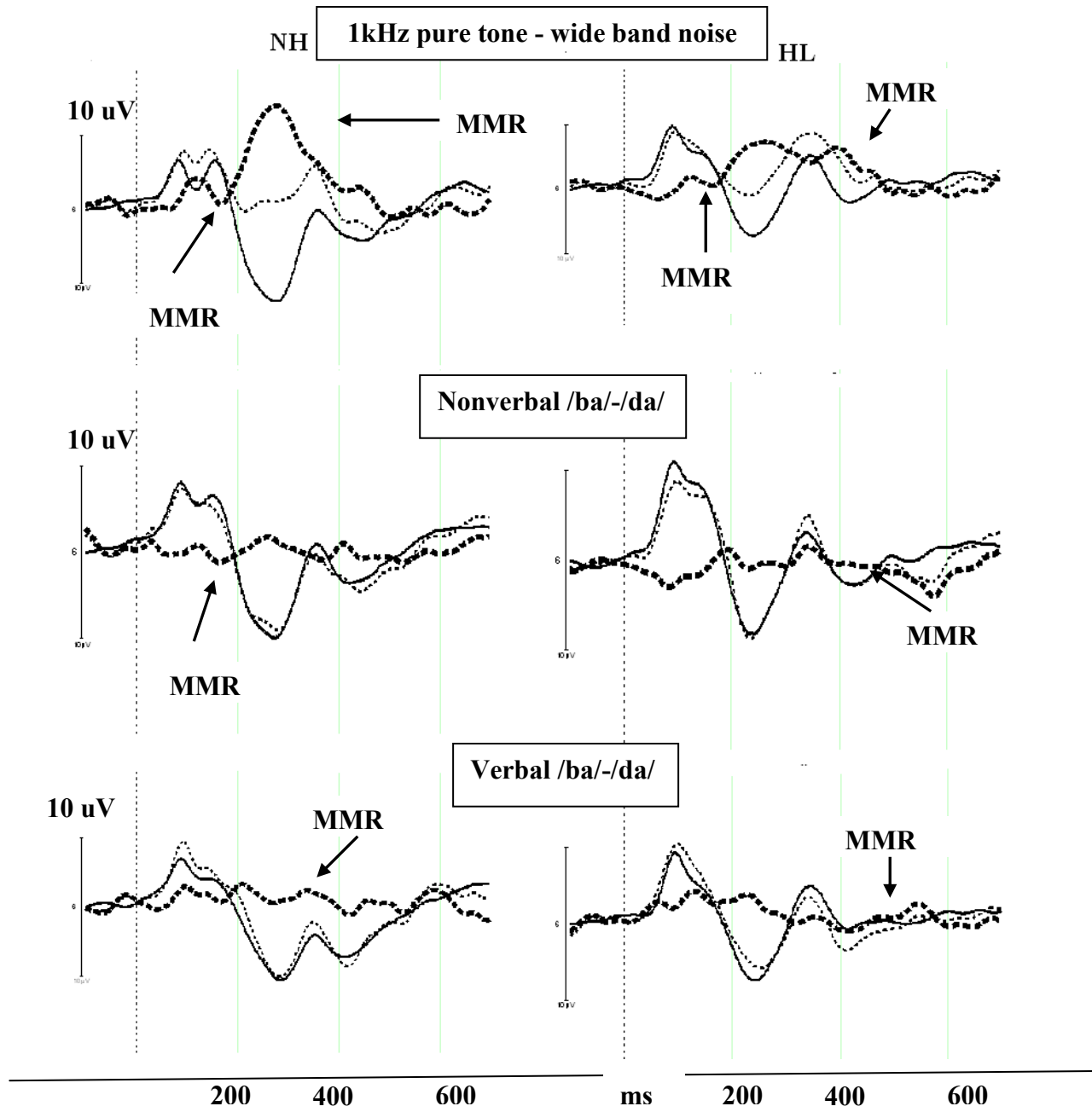


Figure 5

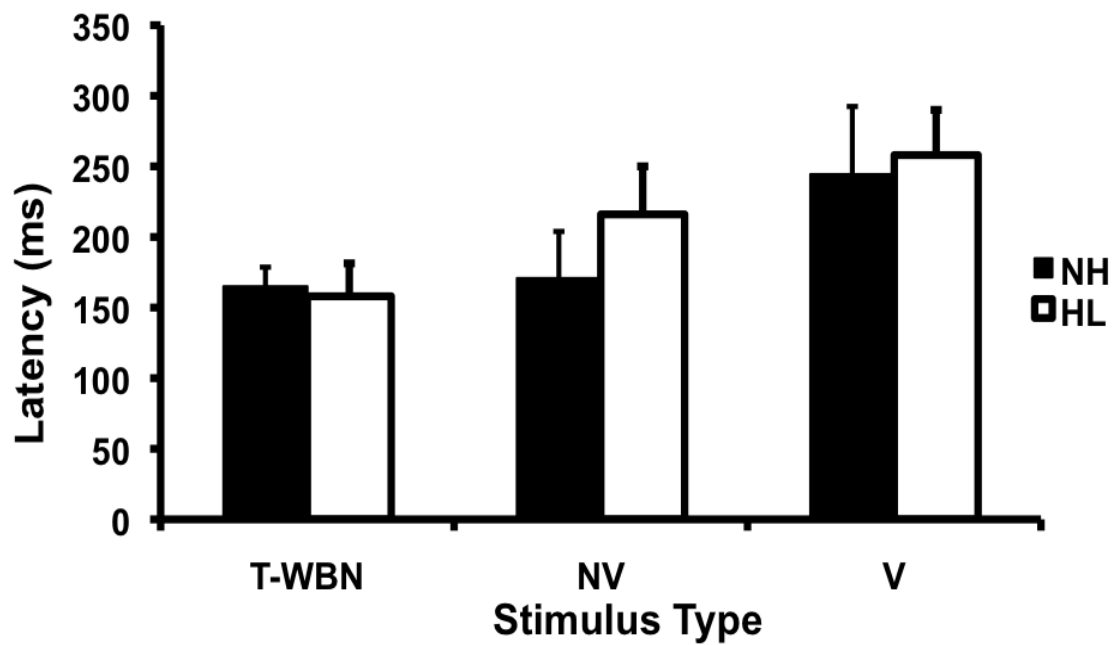


Figure 6

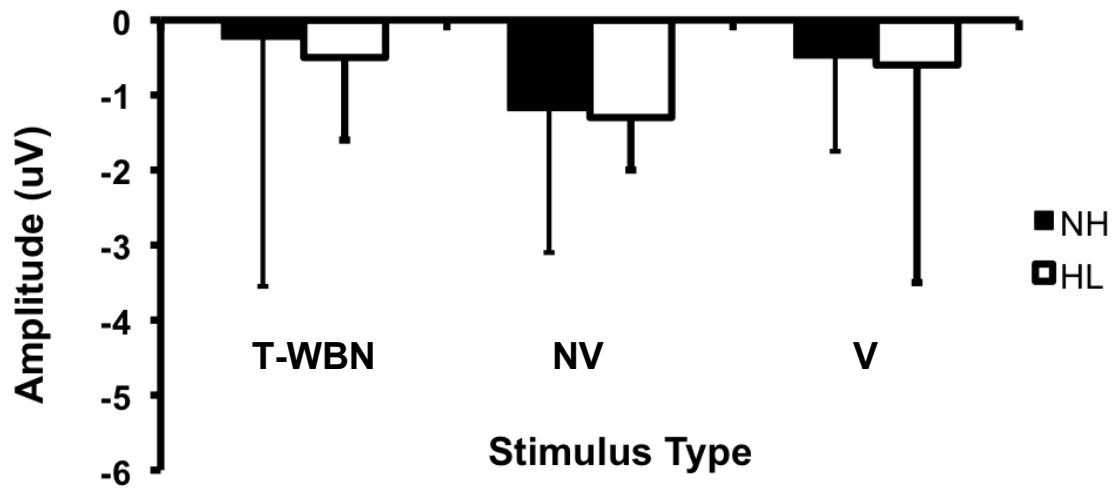
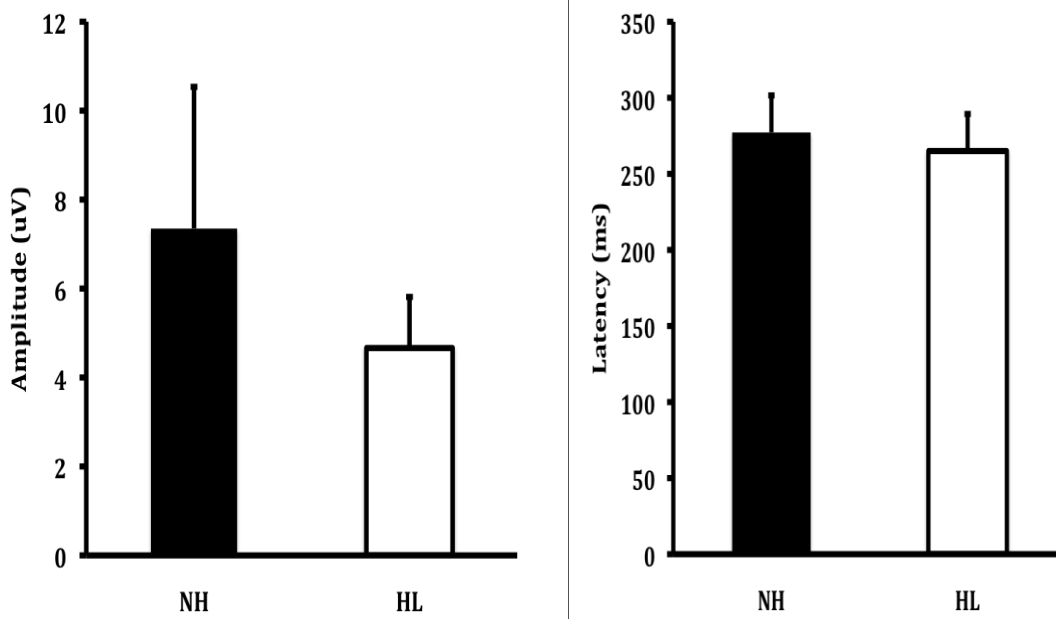


Figure 7



Annexe C

Données individuelles reliées aux ondes N1 et P2

Tableau I. Présence (P) et absence (A) des ondes N1 et P2 avec les trois stimuli fréquents, son pur (1 kHz), nonverbal /ba/ (NV /ba/) et verbal (V /ba/), enregistrées chez les enfants normo-entendants (NE) âgés entre 9 et 12 ans.

| NE | Âge (mois) | 1 kHz | | NV /ba/ | | V /ba/ | |
|----|---------------|-------|----|---------|----|--------|----|
| | | N1 | P2 | N1 | P2 | N1 | P2 |
| 1 | 127 | P | P | P | P | P | P |
| 2 | 143 | A | A | A | A | A | A |
| 3 | 118 | P | P | P | P | P | P |
| 4 | 134 | P | P | P | P | P | P |
| 5 | 138 | P | P | P | P | P | P |
| 6 | 126 | P | P | P | P | P | P |
| 7 | 131 | A | A | A | A | A | A |
| 8 | 148 | P | P | P | P | P | P |
| 9 | 125 | P | P | P | P | P | P |
| 10 | 146 | P | P | P | P | P | P |
| 11 | 122 | P | P | P | P | P | P |
| 12 | 143 | P | P | P | P | P | P |
| 13 | 138 | P | P | P | P | P | P |
| 14 | 111 | A | A | A | A | A | A |
| 15 | 142 | P | P | P | P | P | P |
| 16 | 133 | P | P | A | A | A | A |

Tableau II. Présence (P) et absence (A) des ondes N1 et P2 avec les trois stimuli fréquents, son pur (1 kHz), nonverbal /ba/ (NV /ba/) et verbal /ba/ (V /ba/), enregistrées chez les enfants malentendants (ME) âgés entre 9 et 12 ans.

| ME | Âge (mois) | 1 kHz | | NV /ba/ | | V /ba/ | |
|-----------|---------------|-------|----|---------|----|--------|----|
| | | N1 | P2 | N1 | P2 | N1 | P2 |
| 1 | 146 | P | P | P | P | P | P |
| 2 | 116 | A | A | A | A | A | A |
| 3 | 144 | A | A | A | A | A | A |
| 4 | 146 | A | A | A | A | A | A |
| 5 | 120 | A | A | A | A | A | A |
| 6 | 146 | P | P | P | P | P | P |
| 7 | 127 | P | P | P | P | P | P |
| 8 | 137 | P | P | P | P | P | P |
| 9 | 140 | P | P | A | A | A | A |
| 10 | 138 | A | A | A | A | A | A |
| 11 | 124 | P | P | P | P | P | P |
| 12 | 136 | P | P | A | A | A | A |

Tableau III. Présence (P) et absence (A) des ondes N1 et P2 avec les trois stimuli fréquents, son pur (1 kHz), nonverbal /ba/ (NV /ba/) et verbal /ba/ (V /ba/), enregistrées chez les enfants ayant un trouble de traitement auditif (TTA) âgés entre 9 et 12 ans.

| TTA | Âge (mois) | 1 kHz | | NV/ba/ | | V /ba/ | |
|-----|---------------|-------|----|--------|----|--------|----|
| | | N1 | P2 | N1 | P2 | N1 | P2 |
| 1 | 117 | A | A | A | A | A | A |
| 2 | 134 | P | P | A | A | P | P |
| 3 | 142 | A | A | A | A | A | A |
| 4 | 130 | A | A | A | A | A | A |
| 5 | 124 | P | P | P | P | P | P |
| 6 | 137 | P | P | P | P | P | P |
| 7 | 130 | P | P | P | P | P | P |
| 8 | 137 | A | A | P | P | P | P |
| 9 | 132 | P | P | P | P | A | A |
| 10 | 140 | P | P | P | P | P | P |
| 11 | 114 | A | A | A | A | A | A |
| 12 | 147 | P | P | P | P | P | P |

Annexe D

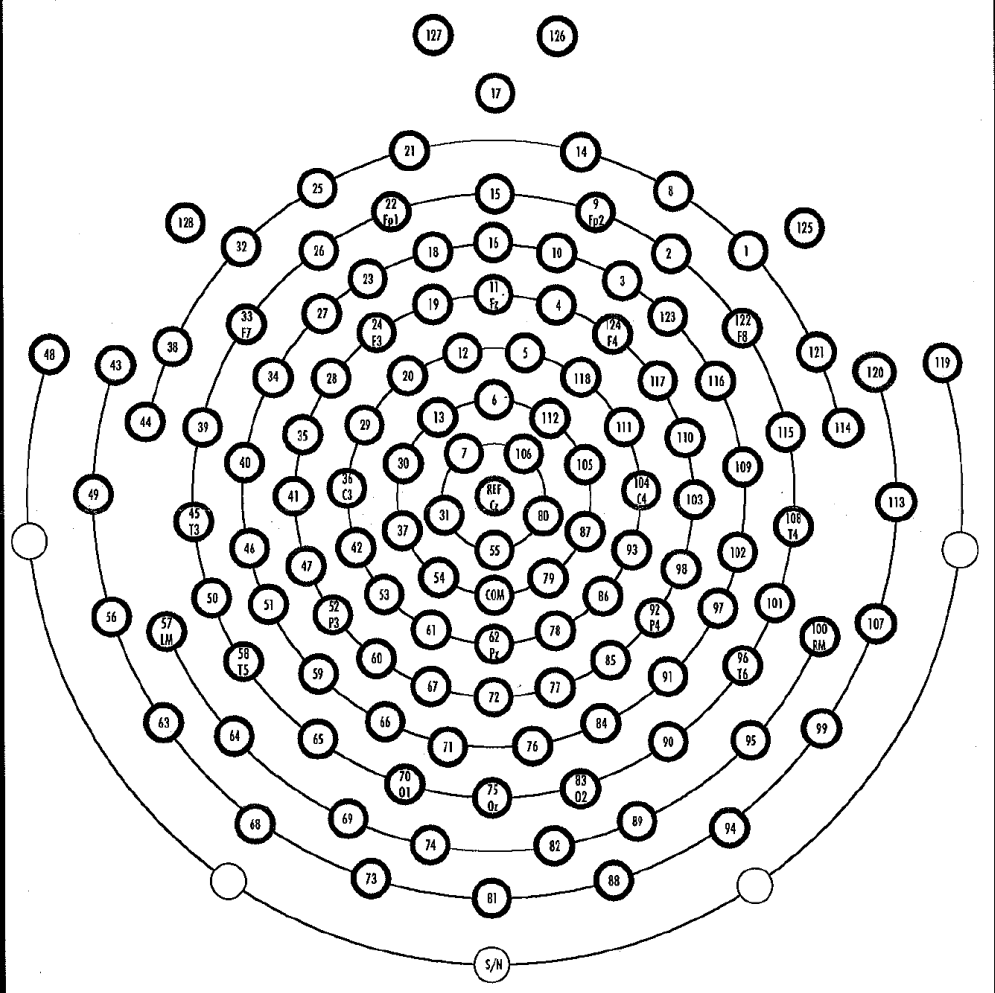
Positionnement des électrodes du bonnet de Geodesic

Sensor Net à 128 électrodes

HydroCel Geodesic Sensor Net

128 Channel Map

Version 1.0



For questions or additional assistance please refer to the EGI Sensor Net Technical Manual or contact us at:

Electrical Geodesics, Inc.
1600 Millrace Drive, Suite 307
Eugene, Oregon USA 97403
Phone: (541) 687-7962 Fax: (541) 687-7963
Email: support@egi.com or info@egi.com

N-PRT-LAM-4300-001

Annexe E

Lettres d'information et formulaires de consentement pour chacun des groupes



FORMULAIRE D'INFORMATION ET DE CONSENTEMENT pour les parents d'enfants entendants

Votre enfant est invité à participer à une étude scientifique approuvée par le comité d'éthique de la recherche du CHU Sainte-Justine et par le comité d'éthique de la recherche des établissements du Centre de recherche interdisciplinaire en réadaptation du Montréal métropolitain (CRIR). Ce projet est mené par Amineh Koravand, audiologiste et étudiante au doctorat en Sciences biomédicales à l'Université de Montréal et par Benoît Jutras, Ph.D. et financé à partir de son fonds de recherche. Il est professeur à l'École d'orthophonie et d'audiologie de l'Université de Montréal, chercheur au Centre de recherche du CHU Sainte-Justine et chercheur associé du CRIR.

Nature du protocole

La recherche s'intitule « Habileté auditive centrale d'enfants malentendants : organisation séquentielle de stimuli acoustiques ». Elle porte sur la capacité des enfants, avec ou sans problème auditif, à reproduire dans l'ordre des séquences de syllabes ou de bruits qu'ils ont préalablement entendus. Les résultats des enfants sans problème auditif seront comparés à ceux des enfants ayant une perte auditive et à ceux des enfants ayant un trouble de traitement auditif pour déterminer si les mesures de ces groupes de sujets sont comparables. Nous étudions cette habileté à retenir dans l'ordre des syllabes ou des bruits entendus puisque celle-ci contribue de façon importante à la perception de la parole.

L'expérience s'échelonnera sur trois rencontres. Les deux premières rencontres se dérouleront selon votre préférence à votre domicile ou au Centre de recherche du CHU Sainte-Justine. Durant ces rencontres, nous évaluerons l'audition de votre enfant et la fonction de son oreille moyenne afin de savoir si le tympan bouge bien aux deux oreilles. Aussi, nous évaluerons ses aptitudes de raisonnement non verbal en lui demandant de compléter des séries d'images. Par la suite, nous procéderons à l'expérimentation qui consiste à reproduire des séquences de syllabes ou de bruits. Votre enfant devra d'abord faire la distinction entre des paires de syllabes, soit /a-/da/ et /ba-/da/, et de bruits. Les syllabes ou les bruits seront présentés dix fois chacun, sous écouteurs. S'il réussit cette épreuve, alors des séquences formées à partir de deux syllabes ou de deux bruits et plus lui seront présentées. Votre enfant sera assis à une table et aura devant lui une boîte de forme carrée comportant deux boutons identiques sur la surface supérieure. Il devra presser le bouton qui correspond à la syllabe ou au bruit entendu. Auparavant, nous lui aurons indiqué quel bouton correspond à chaque syllabe ou bruit. Il pourra se pratiquer plusieurs fois avant de commencer le test.

La troisième rencontre aura lieu au Centre de recherche du CHU Sainte-Justine. Durant cette rencontre, votre enfant sera assis confortablement et on lui placera sur la tête un bonnet de tissu muni de petits capteurs métalliques (électrodes). Votre enfant portera aussi une paire d'écouteurs à travers lesquels des sons seront présentés. Les petits capteurs servent à mesurer les modifications de l'activité électrique du cerveau à la suite de la présentation des sons. Il n'y a pas



de douleur associée à la pose du bonnet et la cueillette de l'activité électrique. Tout au plus, votre enfant pourrait être incommodé par le temps nécessaire à l'installation et par une légère sensation d'irritation du cuir chevelu lors de la pose des électrodes. Pendant qu'il entendra les sons, votre enfant regardera un film muet présenté sur un moniteur. Il n'aura pas à répondre ni à porter attention aux sons. Les données recueillies seront enregistrées sur des ordinateurs sous la forme d'un graphique. Pour ces épreuves, nous ne pourrions pas vous communiquer les résultats individuels de votre enfant puisque l'analyse des résultats sera seulement effectuée pour l'ensemble des enfants qui participent à l'étude. La durée de chaque session sera d'environ deux heures. Vous pourrez observer votre enfant durant le déroulement des épreuves, s'il le désire.

Risques et avantages

Aucun risque n'est relié aux tâches que votre enfant aura à effectuer. Cependant, la participation de votre enfant aux évaluations pourrait entraîner un certain état de stress ou de fatigue. Des pauses sont prévues pour contrer la fatigue. Le seul inconvénient de l'étude consiste au fait que les éponges positionnées sur la tête de l'enfant sont mouillées. Ainsi, l'enfant peut à prime abord ressentir un certain inconfort. Si votre enfant semble inconfortable avec l'une ou l'autre des procédures, la démarche d'évaluation sera arrêtée.

Dans le cadre de la participation de votre enfant à l'étude, il aura une évaluation audiolinguistique récente (si la dernière remonte à plus d'un an).

Compensation prévue pour vos dépenses et inconvénients

Lorsque vous aurez à vous déplacer pour que votre enfant participe à l'étude, il est entendu qu'une indemnisation financière de 10\$/déplacement est prévue pour couvrir les frais de transport.

Personnes contact

Pour plus d'information concernant cette recherche, contactez Amineh Koravand au (514) 345-4931, poste 4156 ou Benoît Jutras au (514) 345-4931, poste 4169 au CHU Sainte-Justine. Pour tout renseignement sur les droits et recours de votre enfant à titre de participant à ce projet de recherche, vous pouvez aussi contacter la conseillère à la clientèle du CHU Sainte-Justine au (514) 345-4931, poste 4749 ou Me Anik Nolet, coordonnatrice à l'éthique de la recherche des établissements du CRIR au (514) 527-4527, poste 2643 (anolet.crir@sss.gouv.qc.ca).

La confidentialité

Tous les documents qui contiennent des renseignements reliés à votre enfant resteront confidentiels. Ils seront codés et seront gardés dans un classeur muni d'un verrou de sûreté au laboratoire de recherche en audiologie du CHU Sainte-Justine. Seule l'équipe de recherche aura accès au code. Cependant, aux fins de vérifier la saine gestion de la recherche, il est possible qu'un délégué du comité d'éthique de la recherche ou des représentants de l'organisme commanditaire consultent les données de la recherche. Aucun renseignement qui permettrait d'identifier votre enfant n'apparaîtra lors du dépouillement, du traitement et de la divulgation des résultats. Par ailleurs, les résultats de cette étude pourront être publiés ou communiqués dans un



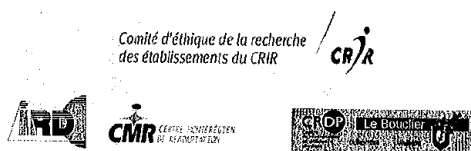
congrès scientifique mais aucune information pouvant identifier votre enfant ne sera alors dévoilée. Les documents contenant vos coordonnées ou celles de votre enfant seront détruites cinq ans suivant la fin de cette étude ou suivant la publication des données reliées à l'étude. Quant aux données, elles seront conservées jusqu'à dix ans après leur publication.

Liberté du consentement et de se retirer

La participation de votre enfant à l'étude est entièrement volontaire. Vous pouvez refuser que votre enfant participe à l'étude et vous pouvez annuler votre consentement en tout temps sans préjudice en communiquant avec Benoît Jutras. Si vous ou votre enfant renoncez à participer au projet, les données recueillies seront conservées à moins que vous souhaiteriez qu'elles soient détruites. Il faudra alors nous informer de votre décision.

En signant ce formulaire de consentement, vous ne renoncez à aucun de vos droits prévus par la loi ni à ceux de votre enfant. De plus, vous ne libérez pas les investigateurs et le promoteur de leur responsabilité légale et professionnelle advenant une situation qui causerait préjudice à votre enfant.

Votre signature apposée au formulaire de consentement indique que vous avez lu l'information contenue dans ce formulaire, qu'une des personnes responsables a répondu de façon satisfaisante à toutes vos questions concernant le projet et que vous consentez à ce que votre enfant participe à l'étude ci-haut mentionnée.



FORMULAIRE DE CONSENTEMENT pour les parents d'enfants entendants

J'affirme avoir lu la lettre d'information, avoir reçu les réponses à mes questions et je consens de façon volontaire à ce que mon enfant participe à l'étude intitulée « Habilité auditive centrale d'enfants malentendants : organisation séquentielle de stimuli acoustiques ». De plus, je reconnais qu'on m'a expliqué verbalement le projet, qu'on m'a remis des notes explicatives complémentaires et qu'on m'a laissé le temps voulu pour prendre ma décision.

Nom de l'enfant : _____
 Signature de l'enfant : _____ date ____ / ____ / 20____
 capable de comprendre la nature de ce projet (Signature)

Assentiment verbal de l'enfant incapable de signer mais capable de comprendre la nature de ce projet : Oui Non

Nom du tuteur légal : _____ lien de parenté : _____
 Signature du tuteur légal : _____ date ____ / ____ / 20____

Formule d'engagement de la personne qui obtient le consentement

J'ai expliqué au participant et à son parent/tuteur tous les aspects pertinents de la recherche et j'ai répondu aux questions qu'ils m'ont posées. Je leur ai indiqué que la participation au projet de recherche est libre et volontaire et que la participation peut être cessée en tout temps.

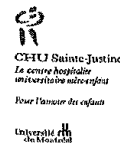
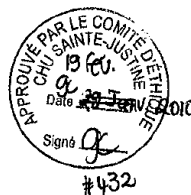
 Nom de la personne qui a obtenu le consentement (lettres moulées) Signature _____ Date _____

Formule d'engagement du chercheur

Le projet de recherche doit être décrit au participant ou à son parent/tuteur ou aux deux à la fois ainsi que les modalités de la participation. Un membre de l'équipe de recherche doit répondre à leurs questions et doit leur expliquer que la participation au projet de recherche est libre et volontaire. L'équipe de recherche s'engage à respecter ce qui a été convenu dans le formulaire de consentement.

 Nom du chercheur responsable (Lettres moulées) Signature _____ Date _____

Comité d'éthique de la recherche
des établissements du CRIR



RECRUTEMENT D'ENFANTS POUR PARTICIPER À UNE RECHERCHE

Chers parents,

Nous réalisons présentement un projet de recherche en audiologie au Centre de recherche du CHU Sainte-Justine et nous sommes à la recherche d'enfants qui pourraient y collaborer. L'étude s'intitule « Habilité auditive centrale d'enfants malentendants : organisation séquentielle de stimuli acoustiques ». Ce projet est mené par Amineh Koravand, audiologiste et étudiante au doctorat en Sciences biomédicales à l'Université de Montréal et par Benoît Jutras, Ph.D., professeur à l'École d'orthophonie et d'audiologie de l'Université de Montréal, chercheur au Centre de recherche du CHU Sainte-Justine et chercheur associé au Centre de recherche interdisciplinaire en réadaptation du Montréal métropolitain (CRIR). Il porte sur la capacité des enfants, avec ou sans problème auditif à reproduire dans l'ordre des séquences de syllabes ou de bruits qu'ils ont préalablement entendus. Les résultats des enfants ayant un fonctionnement auditif normal seront comparés à ceux des enfants ayant une perte auditive et à ceux d'enfants ayant un trouble de traitement auditif. Nous vérifions cette habileté à retenir dans l'ordre des syllabes ou des bruits entendus puisque cette capacité contribue de façon importante à la perception de la parole. Les critères de sélection des enfants entendants sont :

- ◆- enfant âgé de 9 ans à 11 ans 11 mois ;
- ◆- enfants ayant une audition normale;
- ◆- droitier (à vérifier avec vous).

L'expérience proposée s'échelonnait sur trois rencontres. Les deux premières rencontres se dérouleront, selon votre préférence, soit à votre domicile, soit au centre de recherche de l'Hôpital Sainte-Justine. La troisième rencontre aura lieu au Centre de recherche de l'Hôpital Sainte-Justine.

Vous trouverez ci-joint une lettre qui vous donnera plus de détails sur le projet et sur l'implication de votre enfant dans cette recherche. Le succès de cette étude dépend de la participation du plus grand nombre d'enfants possible. Votre collaboration s'avère donc fort précieuse. Si vous désirez plus d'informations, veuillez contacter Amineh Koravand au (514) 345-4931 poste 4156 ou Benoît Jutras au (514) 345-4931 poste 4169. Par ailleurs, si vous acceptez que votre enfant participe à ce projet, nous vous demandons de retourner la dernière page de la lettre d'information dûment complétée en utilisant l'enveloppe-réponse et nous vous contacterons pour convenir d'un temps de rencontre.

Nous vous remercions de contribuer à l'avancement des connaissances dans le domaine de la surdité et vous prions de recevoir nos sincères salutations.

Amineh Koravand, M.P.A., Audiologiste,
Candidat au doctorat, Sciences biomédicales
Université de Montréal
Centre de recherche, CHU Sainte-Justine

Benoît Jutras, Ph.D.
Université de Montréal
Chercheur, CHU Sainte-Justine
Chercheur associé du CRIR



Comité d'éthique de la recherche
des établissements du CRIR



LETTRE D'INFORMATION aux parents d'enfants entendants

Votre enfant est invité à participer à une étude scientifique approuvée par le comité d'éthique de la recherche du CHU Sainte-Justine et par le comité d'éthique de la recherche des établissements du Centre de recherche interdisciplinaire en réadaptation du Montréal métropolitain (CRIR). La recherche s'intitule « Habilité auditive centrale d'enfants malentendants : organisation séquentielle de stimuli acoustiques ». Elle est menée par Amineh Koravand, audiologiste et étudiante au doctorat en Sciences biomédicales à l'Université de Montréal et par Benoît Jutras, Ph.D., professeur à l'École d'orthophonie et d'audiologie de l'Université de Montréal, chercheur au Centre de recherche du CHU Sainte-Justine et chercheur associé du CRIR. Ce projet est financé à partir du fonds de recherche de Benoît Jutras.

L'expérience s'échelonne sur trois rencontres. Les deux premières rencontres se dérouleront selon votre préférence à votre domicile ou au Centre de recherche de l'Hôpital Sainte-Justine. Durant ces rencontres, nous évaluerons l'audition de votre enfant et la fonction de son oreille moyenne afin de savoir si le tympan bouge bien aux deux oreilles. Nous évaluerons également ses aptitudes de raisonnement non verbal en lui demandant de compléter des séries d'images. Par la suite, nous procéderons à l'expérimentation qui consiste à reproduire dans l'ordre des séquences de syllabes ou de bruits. Votre enfant devra d'abord faire la distinction entre des paires de syllabes, soit /a/-/da/ et /ba/-/da/, et de bruits. Les syllabes ou les bruits seront présentés sous écouteurs. Si l'enfant réussit cette épreuve, alors des séquences formées à partir de deux syllabes ou de deux bruits et plus lui seront présentées.

La troisième rencontre aura lieu au Centre de recherche du CHU Sainte-Justine. Durant cette rencontre, votre enfant sera assis confortablement et on lui placera sur la tête un bonnet de tissu muni de petits capteurs métalliques (électrodes). Votre enfant portera aussi une paire d'écouteurs à travers lesquels des sons seront présentés. Les petits capteurs servent à mesurer les modifications de l'activité électrique du cerveau à la suite de la présentation des sons. Il n'y a pas de douleur associée à la pose du bonnet et la cueillette de l'activité électrique. Tout au plus, votre enfant pourrait être incommodé par le temps nécessaire à l'installation et par une légère sensation d'irritation du cuir chevelu lors de la pose des électrodes. Pendant qu'il entendra les sons, votre enfant regardera un film muet présenté sur un moniteur. Il n'aura pas à répondre ni à porter attention aux sons. Les données recueillies seront enregistrées sur des ordinateurs sous la forme d'un graphique. Pour ces épreuves, nous ne pourrions pas vous communiquer les résultats individuels de votre enfant puisque l'analyse des résultats sera seulement effectuée pour l'ensemble des enfants qui participent à l'étude.

Aucun risque n'est relié aux tâches que votre enfant aura à effectuer. Cependant, la participation de votre enfant aux évaluations pourrait entraîner un certain état de stress ou de fatigue. Des pauses sont prévues pour contrer la fatigue. Un inconvénient de l'étude consiste au fait que les éponges positionnées sur la tête de l'enfant sont mouillées. Ainsi, l'enfant peut à prime abord

Version modifiée le 06 janvier 2010



avoir un certain inconfort. Nous recommandons donc d'apporter un chandail de rechange à l'évaluation.

Il est entendu que la participation de votre enfant n'aura aucun effet sur les soins et services qu'il reçoit ou sur tout traitement médical. De plus, si votre enfant semble inconfortable avec l'une ou l'autre des procédures, la démarche d'évaluation sera arrêtée. La durée de chaque session sera d'environ deux heures.

Tous les documents qui contiennent des renseignements reliés à votre enfant resteront confidentiels et seront gardés dans un classeur muni d'un verrou de sûreté au laboratoire de recherche en audiologie du CHU Sainte-Justine. Cependant, aux fins de vérifier la saine gestion de la recherche, il est possible qu'un délégué du comité d'éthique de la recherche ou des représentants de l'organisme commanditaire consultent les données de la recherche. Aucun renseignement qui permettrait d'identifier votre enfant n'apparaîtra lors du dépouillement, du traitement et de la divulgation des résultats. Par ailleurs, les résultats de cette étude pourront être publiés ou communiqués dans un congrès scientifique mais aucune information pouvant identifier votre enfant ne sera alors dévoilée.

La participation de votre enfant à l'étude est entièrement volontaire. Vous pourrez observer votre enfant durant le déroulement des épreuves, s'il le désire.

En donnant votre accord pour que votre enfant participe à l'étude, nous réaliserons une évaluation audiolinguistique récente dont les résultats vous seront transmis. Vous pouvez refuser que votre enfant participe à l'étude et vous pouvez annuler votre consentement en tout temps sans préjudice en contactant Amineh Koravand (tél : (514) 345-4931, poste 4156) ou Benoît Jutras (tél. : (514) 345-4931, poste 4169).

-----X-----X----- DÉCOUPEZ-----X-----X----- DÉCOUPEZ---X-----X-----
Enfant entendant

Je consens à ce que vous me contactiez pour que mon enfant participe à votre recherche qui s'intitule « Habileté auditive centrale d'enfants malentendants : organisation séquentielle de stimuli acoustiques ».

Nom de l'enfant _____

Nom du tuteur légal (lien de parenté) _____

Signature du tuteur légal _____

Date de naissance de l'enfant _____

Numéro de téléphone () _____

Date _____



FORMULAIRE D'INFORMATION ET DE CONSENTEMENT pour les parents d'enfants malentendants

Votre enfant est invité à participer à une étude scientifique approuvée par le comité d'éthique de la recherche du CHU Sainte-Justine et par le comité d'éthique de la recherche des établissements du Centre de recherche interdisciplinaire en réadaptation du Montréal métropolitain (CRIR). Ce projet est mené par Amineh Koravand, audiologiste et étudiante au doctorat en Sciences biomédicales à l'Université de Montréal et par Benoît Jutras, Ph.D. et financé à partir de son fonds de recherche. Il est professeur à l'École d'orthophonie et d'audiologie de l'Université de Montréal, chercheur au Centre de recherche du CHU Sainte-Justine et chercheur associé du CRIR.

Nature du protocole

La recherche s'intitule « Habilité auditive centrale d'enfants malentendants : organisation séquentielle de stimuli acoustiques ». Elle porte sur la capacité des enfants, avec ou sans problème auditif, à reproduire dans l'ordre des séquences de syllabes ou de bruits qu'ils ont préalablement entendus. Les résultats des enfants sans problème auditif seront comparés à ceux des enfants ayant une perte auditive et à ceux des enfants ayant un trouble de traitement auditif pour déterminer si les mesures de ces groupes de sujets sont comparables. Nous étudions cette habileté à retenir dans l'ordre des syllabes ou des bruits entendus puisque celle-ci contribue de façon importante la perception de la parole.

L'expérience s'échelonne sur trois rencontres. La première rencontre se déroulera au centre de recherche du CHU Sainte-Justine, si la dernière évaluation audiolinguistique date de plus d'un an, si non, elle peut avoir lieu à votre domicile ou au Centre de recherche du CHU Sainte-Justine. La deuxième rencontre se déroulera, selon votre préférence, à votre domicile ou au Centre de recherche du CHU Sainte-Justine. La troisième rencontre aura lieu au Centre de recherche du CHU Sainte-Justine. Durant les deux premières rencontres, nous évaluerons l'audition de votre enfant et la fonction de son oreille moyenne afin de savoir si le tympan bouge bien aux deux oreilles. Aussi, nous évaluerons ses aptitudes de raisonnement non verbal en lui demandant de compléter des séries d'images. Par la suite, nous procéderons à l'expérimentation qui consiste à reproduire des séquences de syllabes ou de bruits. Votre enfant devra d'abord faire la distinction entre des paires de syllabes, soit /a/-/da/ et /ba/-/da/, et de bruits. Les syllabes ou les bruits seront présentés dix fois chacun, sous écouteurs. S'il réussit cette épreuve, alors des séquences formées à partir de deux syllabes ou de deux bruits et plus lui seront présentées. Votre enfant sera assis à une table et aura devant lui une boîte de forme carrée comportant deux boutons identiques sur la surface supérieure. Il devra presser le bouton qui correspond à la syllabe ou au bruit entendu. Auparavant, nous lui aurons indiqué quel bouton correspond à chaque syllabe ou bruit. Il pourra se pratiquer plusieurs fois avant de commencer le test.

Durant la troisième rencontre, votre enfant sera assis confortablement et on lui placera sur la tête un bonnet de tissu muni de petits capteurs métalliques (électrodes). Votre enfant portera



aussi une paire d'écouteurs à travers lesquels des sons seront présentés. Les petits capteurs servent à mesurer les modifications de l'activité électrique du cerveau à la suite de la présentation des sons. Il n'y a pas de douleur associée à la pose du bonnet et la cueillette de l'activité électrique. Tout au plus, votre enfant pourrait être incommodé par le temps nécessaire à l'installation et par une légère sensation d'irritation du cuir chevelu lors de la pose des électrodes. Pendant qu'il entendra les sons, votre enfant regardera un film muet présenté sur un moniteur. Il n'aura pas à répondre ni à porter attention aux sons. Les données recueillies seront enregistrées sur des ordinateurs sous la forme d'un graphique. Pour ces épreuves, nous ne pourrions pas vous communiquer les résultats individuels de votre enfant puisque l'analyse des résultats sera seulement effectuée pour l'ensemble des enfants qui participent à l'étude. La durée de chaque session sera d'environ deux heures. Vous pourrez observer votre enfant durant le déroulement des épreuves, s'il le désire.

Risques et avantages

Aucun risque n'est relié aux tâches que votre enfant aura à effectuer. Cependant, la participation de votre enfant aux évaluations pourrait entraîner un certain état de stress ou de fatigue. Des pauses sont prévues pour contrer la fatigue. Le seul inconvénient de l'étude consiste au fait que les éponges positionnées sur la tête de l'enfant sont mouillées. Ainsi, l'enfant peut à prime abord ressentir un certain inconfort. Si votre enfant semble inconfortable avec l'une ou l'autre des procédures, la démarche d'évaluation sera arrêtée.

Dans le cadre de la participation de votre enfant à l'étude, il aura une évaluation audiolinguistique récente (si la dernière remonte à plus d'un an).

Compensation prévue pour vos dépenses et inconvénients

Lorsque vous aurez à vous déplacer pour que votre enfant participe à l'étude, il est entendu qu'une indemnisation financière de 10\$/déplacement est prévue pour couvrir les frais de transport.

Personnes contact

Pour plus d'information concernant cette recherche, contactez Amineh Koravand au (514) 345-4931, poste 4156 ou Benoît Jutras au (514) 345-4931, poste 4169 au CHU Sainte-Justine. Pour tout renseignement sur les droits et recours de votre enfant à titre de participant à ce projet de recherche, vous pouvez aussi contacter la conseillère à la clientèle du CHU Sainte-Justine au (514) 345-4931, poste 4749 ou Me Anik Nolet, coordonnatrice à l'éthique de la recherche des établissements du CRIR au (514) 527-4527, poste 2643 (anolet.crir@ssss.gouv.qc.ca).

La confidentialité

Tous les documents qui contiennent des renseignements reliés à votre enfant resteront confidentiels. Ils seront codés et seront gardés dans un classeur muni d'un verrou de sûreté au laboratoire de recherche en audiologie du CHU Sainte-Justine. Seule l'équipe de recherche aura accès au code. Cependant, aux fins de vérifier la saine gestion de la recherche, il est possible qu'un délégué du comité d'éthique de la recherche ou des représentants de l'organisme



commanditaire consultent les données de la recherche. Aucun renseignement qui permettrait d'identifier votre enfant n'apparaîtra lors du dépouillement, du traitement et de la divulgation des résultats. Par ailleurs, les résultats de cette étude pourront être publiés ou communiqués dans un congrès scientifique mais aucune information pouvant identifier votre enfant ne sera alors dévoilée. Les documents contenant vos coordonnées ou celles de votre enfant seront détruites cinq ans suivant la fin de cette étude ou suivant la publication des données reliées à l'étude. Quant aux données, elles seront conservées jusqu'à dix ans après leur publication.

Liberté du consentement et de se retirer

La participation de votre enfant à l'étude est entièrement volontaire. Vous pouvez refuser que votre enfant participe à l'étude et vous pouvez annuler votre consentement en tout temps sans préjudice en communiquant avec Benoît Jutras. Il est aussi entendu que votre enfant peut mettre fin à sa participation à n'importe quel moment durant le projet sans qu'il n'y ait aucun effet sur les services que votre enfant reçoit au CHU Sainte-Justine, à l'Institut Raymond-Dewar, au Centre montréalais de réadaptation ou au Centre le Bouclier. Si vous ou votre enfant renoncez à participer au projet, les données recueillies seront conservées à moins que vous souhaiteriez qu'elles soient détruites. Il faudra alors nous informer de votre décision.

En signant ce formulaire de consentement, vous ne renoncez à aucun de vos droits prévus par la loi ni à ceux de votre enfant. De plus, vous ne libérez pas les investigateurs et le promoteur de leur responsabilité légale et professionnelle advenant une situation qui causerait préjudice à votre enfant.

Votre signature apposée au formulaire de consentement indique que vous avez lu l'information contenue dans ce formulaire, qu'une des personnes responsables a répondu de façon satisfaisante à toutes vos questions concernant le projet et que vous consentez à ce que votre enfant participe à l'étude ci-haut mentionnée.



**FORMULAIRE DE CONSENTEMENT
pour les parents d'enfants malentendants**

J'affirme avoir lu la lettre d'information, avoir reçu les réponses à mes questions et je consens de façon volontaire à ce que mon enfant participe à l'étude intitulée « Habileté auditive centrale d'enfants malentendants : organisation séquentielle de stimuli acoustiques ». De plus, je reconnais qu'on m'a expliqué verbalement le projet, qu'on m'a remis des notes explicatives complémentaires et qu'on m'a laissé le temps voulu pour prendre ma décision.

Nom de l'enfant : _____
 Signature de l'enfant : _____ date ____/____/20____
 capable de comprendre la nature de ce projet (Signature)

Assentiment verbal de l'enfant incapable de signer mais capable de comprendre la nature de ce projet : Oui Non

Nom du tuteur légal : _____ lien de parenté : _____
 Signature du tuteur légal : _____ date ____/____/20____

Formule d'engagement de la personne qui obtient le consentement

J'ai expliqué au participant et à son parent/tuteur tous les aspects pertinents de la recherche et j'ai répondu aux questions qu'ils m'ont posées. Je leur ai indiqué que la participation au projet de recherche est libre et volontaire et que la participation peut être cessée en tout temps.

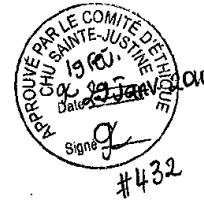
 Nom de la personne qui a obtenu le consentement (lettres moulées) Signature _____ Date _____

Formule d'engagement du chercheur

Le projet de recherche doit être décrit au participant ou à son parent/tuteur ou aux deux à la fois ainsi que les modalités de la participation. Un membre de l'équipe de recherche doit répondre à leurs questions et doit leur expliquer que la participation au projet de recherche est libre et volontaire. L'équipe de recherche s'engage à respecter ce qui a été convenu dans le formulaire de consentement.

 Nom du chercheur responsable (Lettres moulées) Signature _____ Date _____

Comité d'éthique de la recherche
des établissements du CRIR



RECRUTEMENT D'ENFANTS POUR PARTICIPER À UNE RECHERCHE

Chers parents,

Nous réalisons présentement un projet de recherche en audiologie au Centre de recherche du CHU Sainte-Justine et nous sommes à la recherche d'enfants qui pourraient y collaborer. L'étude s'intitule « Habileté auditive centrale d'enfants malentendants : organisation séquentielle de stimuli acoustiques ». Ce projet est mené par Amineh Koravand, audiologiste et étudiante au doctorat en Sciences biomédicales à l'Université de Montréal et par Benoît Jutras, Ph.D., professeur à l'École d'orthophonie et d'audiologie de l'Université de Montréal, chercheur au Centre de recherche du CHU Sainte-Justine et chercheur associé au Centre de recherche interdisciplinaire en réadaptation du Montréal métropolitain (CRIR). Il porte sur la capacité des enfants, avec ou sans problème auditif à reproduire dans l'ordre des séquences de syllabes ou de bruits qu'ils ont préalablement entendus. Les résultats des enfants ayant un fonctionnement auditif normal seront comparés à ceux des enfants ayant une perte auditive et à ceux d'enfants ayant un trouble de traitement auditif. Nous vérifions cette habileté à retenir dans l'ordre des syllabes ou des bruits entendus puisque cette capacité contribue de façon importante à la perception de la parole.

Avec la collaboration du personnel du CHU Sainte-Justine, de l'Institut Raymond-Dewar ou du Centre montréalais de réadaptation, votre enfant a été sélectionné comme candidat potentiel pour participer au projet de recherche. Les critères de sélection sont les suivants :

- ◆ - enfant âgé de 9 ans à 11 ans 11 mois ;
- ◆ - ayant une perte auditive neurosensorielle aux deux oreilles ;
- ◆ - qui porte des appareils auditifs depuis au moins deux ans ;
- ◆ - qui a été suivi en orthophonie ou en audiologie au moins 2 ans ;
- ◆ - droitier (à vérifier avec vous).

L'expérience proposée s'échelonne sur trois rencontres. La première rencontre se déroulera au centre de recherche du CHU Sainte-Justine, si la dernière évaluation audiologique date de plus d'un an, si non, elle peut avoir lieu à votre domicile ou au Centre de recherche du CHU Sainte-Justine. La deuxième rencontre se déroulera, selon votre préférence, à votre domicile ou au Centre de recherche du CHU Sainte-Justine. La troisième rencontre aura lieu au Centre de recherche du CHU Sainte-Justine.

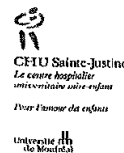
Vous trouverez ci-joint une lettre qui vous donnera plus de détails sur le projet et sur l'implication de votre enfant dans cette recherche. Le succès de cette étude dépend de la participation du plus grand nombre d'enfants possible. Votre collaboration s'avère donc fort précieuse. Si vous désirez plus d'informations, veuillez contacter Amineh Koravand au (514) 345-4931 poste 4156 ou Benoît Jutras au (514) 345-4931 poste 4169. Par ailleurs, si vous acceptez que votre enfant participe à ce projet, nous vous demandons de retourner la dernière page de la lettre d'information dûment complétée en utilisant l'enveloppe-réponse et nous vous contacterons pour convenir d'un temps de rencontre.

Nous vous remercions de contribuer à l'avancement des connaissances dans le domaine de la surdité et vous prions de recevoir nos sincères salutations.

Amineh Koravand, M.P.A., Audiologiste,
Candidate au doctorat, Sciences biomédicales
Université de Montréal
Centre de recherche, CHU Sainte-Justine

Benoît Jutras, Ph.D.
Université de Montréal
Chercheur, CHU Sainte-Justine
Chercheur associé du CRIR

Comité d'éthique de la recherche
des établissements du CRIR



LETTRE D'INFORMATION aux parents d'enfants malentendants

Votre enfant est invité à participer à une étude scientifique approuvée par le comité d'éthique de la recherche du CHU Sainte-Justine et par le comité d'éthique de la recherche des établissements du Centre de recherche interdisciplinaire en réadaptation du Montréal métropolitain (CRIR). Ce projet est mené par Amineh Koravand, audiologiste et étudiante au doctorat en Sciences biomédicales à l'Université de Montréal et par Benoît Jutras, Ph.D., professeur à l'École d'orthophonie et d'audiologie de l'Université de Montréal, chercheur au Centre de recherche du CHU Sainte-Justine et chercheur associé du CRIR.

L'expérience s'échelonnera sur trois rencontres. Les deux premières rencontres se dérouleront selon votre préférence à votre domicile ou au Centre de recherche du CHU Sainte-Justine. Durant ces rencontres, nous évaluerons l'audition de votre enfant, si la dernière évaluation audiologique date de plus d'un an et la fonction de son oreille moyenne afin de savoir si le tympan bouge bien aux deux oreilles. Nous évaluerons également ses aptitudes de raisonnement non verbal en lui demandant de compléter des séries d'images. Par la suite, nous procéderons à l'expérimentation qui consiste à reproduire dans l'ordre des séquences de syllabes ou de bruits. Votre enfant devra d'abord faire la distinction entre des paires de syllabes, soit /a/-/da/ et /ba/-/da/, et de bruits. Les syllabes ou les bruits seront présentés sous écouteurs. Si l'enfant réussit cette épreuve, alors des séquences formées à partir de deux syllabes ou de deux bruits et plus lui seront présentées.

La troisième rencontre aura lieu au Centre de recherche du CHU Sainte-Justine. Durant cette rencontre, votre enfant sera assis confortablement et on lui placera sur la tête un bonnet de tissu muni de petits capteurs métalliques (électrodes). Votre enfant portera aussi une paire d'écouteurs à travers lesquels des sons seront présentés. Les petits capteurs servent à mesurer les modifications de l'activité électrique du cerveau à la suite de la présentation des sons. Il n'y a pas de douleur associée à la pose du bonnet et la cueillette de l'activité électrique. Tout au plus, votre enfant pourrait être incommodé par le temps nécessaire à l'installation et par une légère sensation d'irritation du cuir chevelu lors de la pose des électrodes. Pendant qu'il entendra les sons, votre enfant regardera un film muet présenté sur un moniteur. Il n'aura pas à répondre ni à porter attention aux sons. Les données recueillies seront enregistrées sur des ordinateurs sous la forme d'un graphique. Pour ces épreuves, nous ne pourrions pas vous communiquer les résultats individuels de votre enfant puisque l'analyse des résultats sera seulement effectuée pour l'ensemble des enfants qui participent à l'étude.

Aucun risque n'est relié aux tâches que votre enfant aura à effectuer. Cependant, la participation de votre enfant aux évaluations pourrait entraîner un certain état de stress ou de fatigue. Des pauses sont prévues pour contrer la fatigue. Un inconvénient de l'étude consiste au fait que les éponges positionnées sur la tête de l'enfant sont mouillées. Ainsi, l'enfant peut à prime abord avoir un certain inconfort. Nous recommandons donc d'apporter un chandail de rechange à l'évaluation.

Version modifiée le 06 janvier 2009



Il est entendu que la participation de votre enfant n'aura aucun effet sur les soins et services qu'il reçoit au CHU Sainte-Justine, à l'Institut Raymond-Dewar, au Centre montréalais de réadaptation ou au Centre le Bouclier. De plus, si votre enfant semble inconfortable avec l'une ou l'autre des procédures, la démarche d'évaluation sera arrêtée. La durée de chaque session sera d'environ deux heures.

Tous les documents qui contiennent des renseignements reliés à votre enfant resteront confidentiels et seront gardés dans un classeur muni d'un verrou de sûreté au laboratoire de recherche en audiologie du CHU Sainte-Justine. Cependant, aux fins de vérifier la saine gestion de la recherche, il est possible qu'un délégué du comité d'éthique de la recherche ou des représentants de l'organisme commanditaire consultent les données de la recherche. Aucun renseignement qui permettrait d'identifier votre enfant n'apparaîtra lors du dépouillement, du traitement et de la divulgation des résultats. Par ailleurs, les résultats de cette étude pourront être publiés ou communiqués dans un congrès scientifique mais aucune information pouvant identifier votre enfant ne sera alors dévoilée.

La participation de votre enfant à l'étude est entièrement volontaire. Vous pourrez observer votre enfant durant le déroulement des épreuves, s'il le désire.

En donnant votre accord pour que votre enfant participe à l'étude, nous réaliserons une évaluation audiolinguistique si la dernière date de plus d'un an dont les résultats vous seront transmis. Vous pouvez refuser que votre enfant participe à l'étude et vous pouvez annuler votre consentement en tout temps sans préjudice en contactant Aminéh Koravand (tél : (514) 345-4931, poste 4156) ou Benoît Jutras (tél. : (514) 345-4931, poste 4169).

----- ✂----- ✂----- ✂ **DÉCOUPEZ** ----- ✂----- ✂----- ✂ **DÉCOUPEZ** ----- ✂----- ✂-----

Enfant malentendant

Je consens à ce que vous me contactiez pour que mon enfant participe à votre recherche qui s'intitule « Habilité auditive centrale d'enfants malentendants : organisation séquentielle de stimuli acoustiques ».

Nom de l'enfant _____

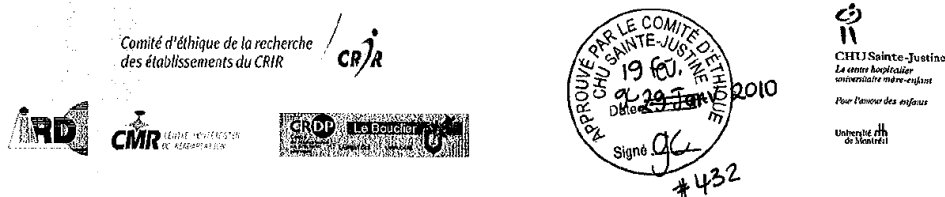
Nom du tuteur légal (lien de parenté) _____

Signature du tuteur légal _____

Date de naissance de l'enfant _____

Numéro de téléphone () _____

Date _____



FORMULAIRE D'INFORMATION ET DE CONSENTEMENT pour les parents d'enfants ayant un trouble de traitement auditif

Votre enfant est invité à participer à une étude scientifique approuvée par le comité d'éthique de la recherche du CHU Sainte-Justine et par le comité d'éthique de la recherche des établissements du Centre de recherche interdisciplinaire en réadaptation du Montréal métropolitain (CRIR). Ce projet est mené par Amineh Koravand, audiologiste et étudiante au doctorat en Sciences biomédicales à l'Université de Montréal et par Benoît Jutras, Ph.D. et financé à partir de son fonds de recherche. Il est professeur à l'École d'orthophonie et d'audiologie de l'Université de Montréal, chercheur au Centre de recherche du CHU Sainte-Justine et chercheur associé du CRIR.

Nature du protocole

La recherche s'intitule « Habileté auditive centrale d'enfants malentendants : organisation séquentielle de stimuli acoustiques ». Elle porte sur la capacité des enfants, avec ou sans problème auditif, à reproduire dans l'ordre des séquences de syllabes ou de bruits qu'ils ont préalablement entendus. Les résultats des enfants sans problème auditif seront comparés à ceux des enfants ayant une perte auditive et à ceux des enfants ayant un trouble de traitement auditif pour déterminer si les mesures sont comparables entre les groupes. Nous étudions cette habileté à retenir dans l'ordre des syllabes ou des bruits entendus puisque celle-ci contribue de façon importante la perception de la parole.

L'expérience s'échelonne sur trois rencontres. La première rencontre se déroulera au centre de recherche du CHU Sainte-Justine, si la dernière évaluation audiolinguistique date de plus d'un an, si non, elle peut avoir lieu à votre domicile ou au Centre de recherche du CHU Sainte-Justine. La deuxième rencontre se déroulera, selon votre préférence, à votre domicile ou au Centre de recherche du CHU Sainte-Justine. La troisième rencontre aura lieu au Centre de recherche du CHU Sainte-Justine. Durant les deux premières rencontres, nous évaluerons l'audition de votre enfant et la fonction de son oreille moyenne afin de savoir si le tympan bouge bien aux deux oreilles. Aussi, nous évaluerons ses aptitudes de raisonnement non verbal en lui demandant de compléter des séries d'images. Par la suite, nous procéderons à l'expérimentation qui consiste à reproduire des séquences de syllabes ou de bruits. Votre enfant devra d'abord faire la distinction entre des paires de syllabes, soit /a/-/da/ et /ba/-/da/, et de bruits. Les syllabes ou les bruits seront présentés dix fois chacun, sous écouteurs. S'il réussit cette épreuve, alors des séquences formées à partir de deux syllabes ou de deux bruits et plus lui seront présentées. Votre enfant sera assis à une table et aura devant lui une boîte de forme carrée comportant deux boutons identiques sur la surface supérieure. Il devra presser le bouton qui correspond à la syllabe ou au bruit entendu. Auparavant, nous lui aurons indiqué quel bouton correspond à chaque syllabe ou bruit. Il pourra se pratiquer plusieurs fois avant de commencer le test.

Durant la troisième rencontre, votre enfant sera assis confortablement et on lui placera sur la tête un bonnet de tissu muni de petits capteurs métalliques (électrodes). Votre enfant portera



aussi une paire d'écouteurs à travers lesquels des sons seront présentés. Les petits capteurs servent à mesurer les modifications de l'activité électrique du cerveau à la suite de la présentation des sons. Il n'y a pas de douleur associée à la pose du bonnet et la cueillette de l'activité électrique. Tout au plus, votre enfant pourrait être incommodé par le temps nécessaire à l'installation et par une légère sensation d'irritation du cuir chevelu lors de la pose des électrodes. Pendant qu'il entendra les sons, votre enfant regardera un film muet présenté sur un moniteur. Il n'aura pas à répondre ni à porter attention aux sons. Les données recueillies seront enregistrées sur des ordinateurs sous la forme d'un graphique. Pour ces épreuves, nous ne pourrions pas vous communiquer les résultats individuels de votre enfant puisque l'analyse des résultats sera seulement effectuée pour l'ensemble des enfants qui participent à l'étude. La durée de chaque session sera d'environ deux heures. Vous pourrez observer votre enfant durant le déroulement des épreuves, s'il le désire.

Risques et avantages

Aucun risque n'est relié aux tâches que votre enfant aura à effectuer. Cependant, la participation de votre enfant aux évaluations pourrait entraîner un certain état de stress ou de fatigue. Des pauses sont prévues pour contrer la fatigue. Le seul inconvénient de l'étude consiste au fait que les éponges positionnées sur la tête de l'enfant sont mouillées. Ainsi, l'enfant peut à prime abord ressentir un certain inconfort. Si votre enfant semble inconfortable avec l'une ou l'autre des procédures, la démarche d'évaluation sera arrêtée.

Dans le cadre de la participation de votre enfant à l'étude, il aura une évaluation audiolinguistique récente (si la dernière remonte à plus d'un an).

Compensation prévue pour vos dépenses et inconvénients

Lorsque vous aurez à vous déplacer pour que votre enfant participe à l'étude, il est entendu qu'une indemnisation financière de 10\$/déplacement est prévue pour couvrir les frais de transport.

Personnes contact

Pour plus d'information concernant cette recherche, contactez Amineh Koravand au (514) 345-4931, poste 4156 ou Benoît Jutras au (514) 345-4931, poste 4169 au CHU Sainte-Justine. Pour tout renseignement sur les droits et recours de votre enfant à titre de participant à ce projet de recherche, vous pouvez aussi contacter la conseillère à la clientèle du CHU Sainte-Justine au (514) 345-4931, poste 4749 ou Me Anik Nolet, coordonnatrice à l'éthique de la recherche des établissements du CRIR au (514) 527-4527, poste 2643 (anolet.crir@ssss.gouv.qc.ca).

La confidentialité

Tous les documents qui contiennent des renseignements reliés à votre enfant resteront confidentiels. Ils seront codés et seront gardés dans un classeur muni d'un verrou de sûreté au laboratoire de recherche en audiologie du CHU Sainte-Justine. Seule l'équipe de recherche aura accès au code. Cependant, aux fins de vérifier la saine gestion de la recherche, il est possible qu'un délégué du comité d'éthique de la recherche ou des représentants de l'organisme



commanditaire consultent les données de la recherche. Aucun renseignement qui permettrait d'identifier votre enfant n'apparaîtra lors du dépouillement, du traitement et de la divulgation des résultats. Par ailleurs, les résultats de cette étude pourront être publiés ou communiqués dans un congrès scientifique mais aucune information pouvant identifier votre enfant ne sera alors dévoilée. Les documents contenant vos coordonnées ou celles de votre enfant seront détruites cinq ans suivant la fin de cette étude ou suivant la publication des données reliées à l'étude. Quant aux données, elles seront conservées jusqu'à dix ans après leur publication.

Liberté du consentement et de se retirer

La participation de votre enfant à l'étude est entièrement volontaire. Vous pouvez refuser que votre enfant participe à l'étude et vous pouvez annuler votre consentement en tout temps sans préjudice en communiquant avec Benoît Jutras. Il est aussi entendu que votre enfant peut mettre fin à sa participation à n'importe quel moment durant le projet sans qu'il n'y ait aucun effet sur les services que votre enfant reçoit au CHU Sainte-Justine, à l'Institut Raymond-Dewar ou au Centre montréalais de réadaptation. Si vous ou votre enfant renoncez à participer au projet, les données recueillies seront conservées à moins que vous souhaiteriez qu'elles soient détruites. Il faudra alors nous informer de votre décision.

En signant ce formulaire de consentement, vous ne renoncez à aucun de vos droits prévus par la loi ni à ceux de votre enfant. De plus, vous ne libérez pas les investigateurs et le promoteur de leur responsabilité légale et professionnelle advenant une situation qui causerait préjudice à votre enfant.

Votre signature apposée au formulaire de consentement indique que vous avez lu l'information contenue dans ce formulaire, qu'une des personnes responsables a répondu de façon satisfaisante à toutes vos questions concernant le projet et que vous consentez à ce que votre enfant participe à l'étude ci-haut mentionnée.



FORMULAIRE DE CONSENTEMENT pour les parents d'enfants ayant un trouble de traitement auditif

J'affirme avoir lu la lettre d'information, avoir reçu les réponses à mes questions et je consens de façon volontaire à ce que mon enfant participe à l'étude intitulée « Habileté auditive centrale d'enfants malentendants : organisation séquentielle de stimuli acoustiques ». De plus, je reconnais qu'on m'a expliqué verbalement le projet, qu'on m'a remis des notes explicatives complémentaires et qu'on m'a laissé le temps voulu pour prendre ma décision.

Nom de l'enfant : _____
 Signature de l'enfant : _____ date ____/____/20____
 capable de comprendre la nature de ce projet (Signature)

Assentiment verbal de l'enfant incapable de signer mais capable de comprendre la nature de ce projet : Oui Non

Nom du tuteur légal : _____ lien de parenté : _____
 Signature du tuteur légal : _____ date ____/____/20____

Formule d'engagement de la personne qui obtient le consentement

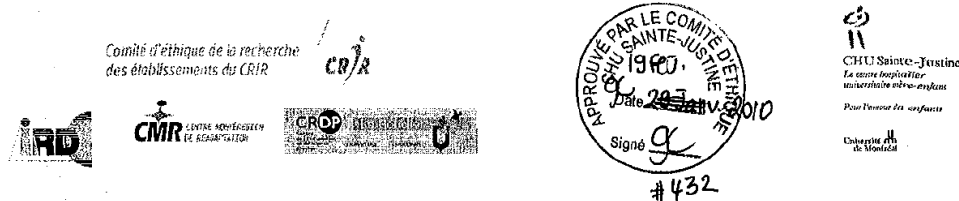
J'ai expliqué au participant et à son parent/tuteur tous les aspects pertinents de la recherche et j'ai répondu aux questions qu'ils m'ont posées. Je leur ai indiqué que la participation au projet de recherche est libre et volontaire et que la participation peut être cessée en tout temps.

 Nom de la personne qui a obtenu le consentement (lettres moulées) Signature Date

Formule d'engagement du chercheur

Le projet de recherche doit être décrit au participant ou à son parent/tuteur ou aux deux à la fois ainsi que les modalités de la participation. Un membre de l'équipe de recherche doit répondre à leurs questions et doit leur expliquer que la participation au projet de recherche est libre et volontaire. L'équipe de recherche s'engage à respecter ce qui a été convenu dans le formulaire de consentement.

 Nom du chercheur responsable (Lettres moulées) Signature Date



RECRUTEMENT D'ENFANTS POUR PARTICIPER À UNE RECHERCHE

Chers parents,

Nous réalisons présentement un projet de recherche en audiologie au Centre de recherche de l'Hôpital Sainte-Justine et nous sommes à la recherche d'enfants qui pourraient y collaborer. L'étude s'intitule : « Habileté auditive centrale d'enfants malentendants : organisation séquentielle de stimuli acoustiques ». Ce projet est mené par Amineh Koravand, audiologiste et étudiante au doctorat en Sciences biomédicales à l'Université de Montréal et par Benoît Jutras, Ph.D., professeur à l'École d'orthophonie et d'audiologie de l'Université de Montréal, chercheur au Centre de recherche du CHU Sainte-Justine et chercheur associé au Centre de recherche interdisciplinaire en réadaptation du Montréal métropolitain (CRIR). Il porte sur la capacité des enfants, avec ou sans problème auditif, à reproduire dans l'ordre des séquences de syllabes ou de bruits qu'ils ont préalablement entendus. Les résultats des enfants sans problème auditif seront comparés à ceux des enfants ayant une perte auditive et à ceux des enfants ayant un trouble de traitement auditif pour déterminer si les mesures de ces groupes de sujets sont comparables. Nous vérifions cette habileté à retenir dans l'ordre des syllabes ou des bruits entendus puisque cette capacité contribue de façon importante à la perception de la parole.

Avec la collaboration du personnel du CHU Sainte-Justine, de l'Institut Raymond-Dewar et du Centre montréalais de réadaptation, votre enfant a été sélectionné comme candidat potentiel pour participer au projet de recherche. Les critères de sélection sont les suivants :

- ◆ - enfant âgé de 9 ans à 11 ans 11 mois ;
- ◆ - ayant une acuité auditive dans les limites de la normale aux deux oreilles ;
- ◆ - ayant un diagnostic de trouble de traitement auditif
- ◆ - droitier (à vérifier avec vous).

L'expérience proposée s'échelonne sur trois rencontres. La première rencontre se déroulera au centre de recherche du CHU Sainte-Justine, si la dernière évaluation audiologique date de plus d'un an, si non, elle peut avoir lieu à votre domicile ou au Centre de recherche du CHU Sainte-Justine. La deuxième rencontre se déroulera, selon votre préférence, à votre domicile ou au Centre de recherche du CHU Sainte-Justine. La troisième rencontre aura lieu au Centre de recherche du CHU Sainte-Justine.

Vous trouverez ci-joint une lettre qui vous donnera plus de détails sur le projet et sur l'implication de votre enfant dans cette recherche. Le succès de cette étude dépend de la participation du plus grand nombre d'enfants possible. Votre collaboration s'avère donc fort précieuse. Si vous désirez plus d'informations, veuillez contacter Amineh Koravand au (514) 345-4931 poste 4156 ou Benoît Jutras au (514) 345-4931 poste 4169. Par ailleurs, si vous acceptez que votre enfant participe à ce projet, nous vous demandons de retourner la dernière page de la lettre d'information dûment complétée en utilisant l'enveloppe-réponse et nous vous contacterons pour convenir d'un temps de rencontre.

Nous vous remercions de contribuer à l'avancement des connaissances dans le domaine de la surdité et vous prions de recevoir nos sincères salutations.

Amineh Koravand, M.P.A., Audiologiste,
Candidate au doctorat, Sciences biomédicales
Université de Montréal
Centre de recherche, CHU Sainte-Justine

Benoît Jutras, Ph.D.
Université de Montréal
Chercheur, CHU Sainte-Justine
Chercheur associé du CRIR



LETTRE D'INFORMATION aux parents d'enfants ayant un trouble de traitement auditif

Votre enfant est invité à participer à une étude scientifique approuvée par le comité d'éthique de la recherche du CHU Sainte-Justine et par le comité d'éthique de la recherche des établissements du Centre de recherche interdisciplinaire en réadaptation du Montréal métropolitain (CRIR). Ce projet est mené par Amineh Koravand, audiologiste et étudiante au doctorat en Sciences biomédicales à l'Université de Montréal et par Benoît Jutras, Ph.D., professeur à l'École d'orthophonie et d'audiologie de l'Université de Montréal, chercheur au Centre de recherche du CHU Sainte-Justine et chercheur associé du CRIR.

L'expérience s'échelonnara sur trois rencontres. Les deux premières rencontres se dérouleront selon votre préférence à votre domicile ou au Centre de recherche du CHU Sainte-Justine. Durant ces rencontres, nous évaluerons l'audition de votre enfant, si la dernière évaluation audiologique date de plus d'un an et la fonction de son oreille moyenne afin de savoir si le tympan bouge bien aux deux oreilles. Nous évaluerons également ses aptitudes de raisonnement non verbal en lui demandant de compléter des séries d'images. Par la suite, nous procéderons à l'expérimentation qui consiste à reproduire dans l'ordre des séquences de syllabes ou de bruits. Votre enfant devra d'abord faire la distinction entre des paires de syllabes, soit /a/-/da/ et /ba/-/da/, et de bruits. Les syllabes ou les bruits seront présentés sous écouteurs. Si l'enfant réussit cette épreuve, alors des séquences formées à partir de deux syllabes ou de deux bruits et plus lui seront présentées.

La troisième rencontre aura lieu au Centre de recherche du CHU Sainte-Justine. Durant cette rencontre, votre enfant sera assis confortablement et on lui placera sur la tête un bonnet de tissu muni de petits capteurs métalliques (électrodes). Votre enfant portera aussi une paire d'écouteurs à travers lesquels des sons seront présentés. Les petits capteurs servent à mesurer les modifications de l'activité électrique du cerveau à la suite de la présentation des sons. Il n'y a pas de douleur associée à la pose du bonnet et la cueillette de l'activité électrique. Tout au plus, votre enfant pourrait être incommodé par le temps nécessaire à l'installation et par une légère sensation d'irritation du cuir chevelu lors de la pose des électrodes. Pendant qu'il entendra les sons, votre enfant regardera un film muet présenté sur un moniteur. Il n'aura pas à répondre ni à porter attention aux sons. Les données recueillies seront enregistrées sur des ordinateurs sous la forme d'un graphique. Pour ces épreuves, nous ne pourrions pas vous communiquer les résultats individuels de votre enfant puisque l'analyse des résultats sera seulement effectuée pour l'ensemble des enfants qui participent à l'étude.

Aucun risque n'est relié aux tâches que votre enfant aura à effectuer. Cependant, la participation de votre enfant aux évaluations pourrait entraîner un certain état de stress ou de fatigue. Des pauses sont prévues pour contrer la fatigue. Un inconvénient de l'étude consiste au fait que les éponges positionnées sur la tête de l'enfant sont mouillées. Ainsi, l'enfant peut à prime abord avoir un certain inconfort. Nous recommandons donc d'apporter un chandail de rechange à l'évaluation.



Il est entendu que la participation de votre enfant n'aura aucun effet sur les soins et services qu'il reçoit au CHU Sainte-Justine, à l'Institut Raymond-Dewar ou au Centre montérégien de réadaptation. De plus, si votre enfant semble inconfortable avec l'une ou l'autre des procédures, la démarche d'évaluation sera arrêtée. La durée de chaque session sera d'environ deux heures.

Tous les documents qui contiennent des renseignements reliés à votre enfant resteront confidentiels et seront gardés dans un classeur muni d'un verrou de sûreté au laboratoire de recherche en audiologie du CHU Sainte-Justine. Cependant, aux fins de vérifier la saine gestion de la recherche, il est possible qu'un délégué du comité d'éthique de la recherche ou des représentants de l'organisme commanditaire consultent les données de la recherche. Aucun renseignement qui permettrait d'identifier votre enfant n'apparaîtra lors du dépouillement, du traitement et de la divulgation des résultats. Par ailleurs, les résultats de cette étude pourront être publiés ou communiqués dans un congrès scientifique mais aucune information pouvant identifier votre enfant ne sera alors dévoilée.

La participation de votre enfant à l'étude est entièrement volontaire. Vous pourrez observer votre enfant durant le déroulement des épreuves, s'il le désire.

En donnant votre accord pour que votre enfant participe à l'étude, nous réaliserons une évaluation audiolinguistique si la dernière date de plus d'un an dont les résultats vous seront transmis. Vous pouvez refuser que votre enfant participe à l'étude et vous pouvez annuler votre consentement en tout temps sans préjudice en contactant Amineh Koravand (tél : (514) 345-4931, poste 4156) ou Benoît Juras (tél. : (514) 345-4931, poste 4169).

-----X-----X-----**DÉCOUPEZ**-----X-----X-----**DÉCOUPEZ**-----X-----X-----
 Enfant ayant TTA

Je consens à ce que vous me contactiez pour que mon enfant participe à votre recherche qui s'intitule « Habileté auditive centrale d'enfants malentendants : organisation séquentielle de stimuli acoustiques ».

Nom de l'enfant _____

Nom du tuteur légal (lien de parenté) _____

Signature du tuteur légal _____

Date de naissance de l'enfant _____

Numéro de téléphone () _____

Date _____

Annexes F

Formulaire de dépistage pré-évaluation

Dépistage

| | | |
|----------------------------------|-------------|-------|
| Renseignements personnels | | |
| Nom enfant : | Âge : | DDN : |
| Nom mère : | Téléphone : | |
| Nom père : | | |

Présentation

- 1) Qui suis-je?
 - Nom
 - Centre de recherche, CHU Ste-Justine, audiologie

- 2) Comment j'ai eu vos coordonnées?
 - IRD
 - CMR
 - Bouclier
 - Autre

J'aurais besoin de 5-10 minutes. Est-ce un bon moment pour vous?

But de l'appel

- Participation de votre enfant à une étude

Situation de l'enfant

- 1) Droitier ou gaucher? _____
- 2) Prise de médicaments (Ritalin)? _____
- 3) Problème scolaire (redoublement, grade)? _____

- 4) Autres difficultés (motrice, visuelle, TDA, apprentissage)?

- 5) Date dernière évaluation :

TTA _____

ME – _____ degré surdité _____

Explications concernant déroulement

- 3 rencontres d'environ 3 hrs :
- 2 évaluations comportementales pouvant se faire à domicile où on demande à l'enfant d'écouter des sons et de peser sur un bouton correspondant au son entendu
- 1 évaluation à Ste-Justine : écoute d'un vidéo et enregistrement de l'activité cérébrale à l'aide d'un casque (non-invasif, aucune prise de médicament requise)

Dates d'évaluation

OSA1 : _____ OSA2 : _____

Électrophysiologie : _____

Votre Adresse

Coordonnées de Ste-Justine

Téléphone : 514-345-4931 poste 4156

Fax : 514-345-4801 (à l'attention de Amineh Koravand ou Benoît Jutras)

Adresse : 3175, chemin de la Côte-Ste-Catherine. Montréal, Qc, H3T 1C5