

Université de Montréal

Étude de la négativité de discordance dans l'amusie congénitale

par
Patricia Moreau

Département de psychologie
Faculté des Arts et des Sciences

Thèse présentée à la Faculté des Arts et des Sciences
en vue de l'obtention du grade de Philosophiae Doctor
en neuropsychologie clinique
option recherche et intervention

juillet, 2013

© Patricia Moreau, 2013

Résumé

L'amusie congénitale est un trouble neuro-développemental qui s'exprime par un déficit de discrimination tonale fine. Le cerveau des amusiques ne répond pas aux petites différences de hauteur, tel que révélé par l'absence de la composante de potentiel évoqué P3b, qui est associée aux processus de discrimination tonale tardifs et conscients. Peu d'études se sont penchées sur les mécanismes précoces et préconscients de discrimination tonale chez les amusiques, qui peuvent être étudiés par l'entremise d'une composante de potentiel évoqué appelée la négativité de discordance (MMN). Certaines études ont démontré qu'il est possible d'enregistrer la MMN pendant la présentation d'un film avec la trame sonore en simultané aux sons visant à évoquer la composante. Toutefois, une étude a démontré que la présentation de la trame sonore réduisait l'amplitude de la MMN, sans néanmoins clarifier la nature de l'effet d'interférence en cause.

Les objectifs du présent projet sont d'abord, d'investiguer les effets à l'origine de la réduction d'amplitude de la MMN observée lors de la présentation d'un film avec la trame sonore, puis d'évaluer cette même composante chez les amusiques. La première étude visait à déterminer si un effet d'interférence attentionnelle ou acoustique était en cause dans la réduction d'amplitude observée sur la MMN lors de la présentation de la trame sonore d'un film. Les résultats ont montré qu'un effet de masquage acoustique, attribuable à la trame sonore, était responsable de la réduction d'amplitude de la MMN, cette dernière augmentant au fur et à mesure que l'intensité sonore de la trame du film était réduite.

La seconde étude a été conduite dans le but d'investiguer la MMN chez les amusiques et de vérifier si le complexe d'ondes anormales N2b-P3b, observé en réponse aux grandes différences tonales chez les amusiques, pouvait être attribuable à un effet de saillance des stimuli. Dans un premier temps, nous avons comparé la MMN des amusiques à celle des contrôles, puis nous avons modifié le paradigme expérimental visant à évoquer la N2b-P3b en ajustant les probabilités d'occurrence des sons présentés aux contrôles en fonction des sons perçus par les amusiques. Les résultats ont montré que le cerveau des amusiques parvient à discriminer les différences de hauteur à un niveau précoce et préconscient, tel que révélé par une MMN normale, mais que les réponses cérébrales plus tardives, associées au processus de discrimination des hauteurs conscient, sont anormales chez les amusiques, et ce, uniquement pour les petites différences de hauteur, tel que révélé par l'absence de la P3b.

En conclusion, ces résultats démontrent que l'amplitude de la MMN est affectée de manière significative par la présentation de la trame sonore d'un film et que cela est attribuable à un effet d'interférence acoustique. Dans un deuxième temps, nous avons démontré que les mécanismes précoces et préconscients de discrimination tonale sont préservés chez les amusiques, et que le déficit sous-jacent à l'amusie congénitale est attribuable à une atteinte du processus de discrimination tonale fine associé à un niveau de traitement cérébral tardif et conscient, le complexe d'ondes anormales N2b-P3b étant pour sa part attribuable à un effet de saillance des stimuli.

Mots-clés : Potentiels évoqués, négativité de discordance, amusie congénitale, trame sonore de film, attention, interférence acoustique, discrimination tonale, et P3b.

Abstract

Congenital amusia is a neurodevelopmental disorder which is characterized by a deficit in fine-grained pitch discrimination. In fact, the amusic brain does not respond to small pitch changes, such as reflected by the absence of the event-related (ERP) component P3b, which is associated to late and conscious pitch discrimination processes. Until now, very few studies focused on early preconscious levels of processing in amusia, which can be studied through an ERP component called the mismatch negativity (MMN). Some studies have demonstrated that the MMN can be recorded while playing the soundtrack of a movie in concurrence with the MMN-critical tones. However, one study demonstrated that playing the movie soundtrack reduced MMN amplitude, but did not investigate the origin of this effect.

The main goals of this project are, first, to investigate the nature of the effect responsible for the MMN reduction observed when playing a movie soundtrack, and secondly, to evaluate the MMN in congenital amusia. The first study aimed to investigate if an attentional or acoustical interference effect could account for the reduction in MMN amplitude observed when playing the movie soundtrack. The results showed that an acoustical masking effect of the movie soundtrack was responsible for the reduction in MMN amplitude. In fact, MMN amplitude increased as the intensity level of the movie soundtrack decreased.

The goal of the second study was to investigate the MMN in congenital amusia, but also to explore if the abnormal N2b-P3b complex observed in amusics in a previous study could be accounted for by an effect of salience of the stimuli. Thus, we first compared the MMN results between amusics and controls, and then, we modified the experimental paradigm

meant to evoke the N2b-P3b by adjusting the probabilities of occurrence of the sounds presented to the controls as a function of the sounds perceived by their matched amusics. The results showed that the amusic brain can detect all pitch changes at an early and preconscious level of processing, such as demonstrated by a normal MMN in both groups. Furthermore, our results showed that the amusic brain does not respond normally solely to small pitch changes at a later conscious level of processing, such as revealed by the absence of the P3b, thus showing that the abnormal N2b-P3b complex of ERP components observed in a previous study is better explained by a saliency effect of the stimuli and does not represent an electrophysiological anomaly specific to congenital amusia.

In conclusion, our results have first shown that MMN amplitude is decreased by presenting a movie soundtrack and this is due to a masking effect at the acoustical level of the soundtrack over the MMN-critical tones. Finally, our second study showed that the early preconscious mechanisms of pitch discrimination are preserved in congenital amusia, and that the pitch deficit underlying congenital amusia is limited to an anomaly in the late and conscious processing of small pitch changes, the abnormal N2b-P3b complex being rather explained by an effect of salience of the stimuli.

Keywords: Event-related potentials, mismatch negativity, congenital amusia, movie soundtrack, attention, acoustic interference, pitch discrimination, and P3b.

Table des matières

Résumé	i
Abstract	iii
Tables des matières	v
Liste des tableaux	vii
Liste des figures	viii
Liste des sigles et abréviations	x
Remerciements	xii
1. Introduction	1
1.1 Introduction générale	2
1.2. La négativité de discordance	4
1.2.1. Définition de la négativité de discordance	4
1.2.2. La MMN avec la trame sonore d'un film	5
1.2.3. Mécanisme d'évocation de la MMN	7
1.2.3.1. Origine fonctionnelle de la MMN	7
1.2.3.2. Générateurs neuronaux de la MMN	8
1.2.4. Facteurs pouvant influencer la MMN	9
1.2.4.1. Les effets de l'attention sur la MMN	9
1.2.4.2. Les effets d'interférence acoustique sur la MMN	14
1.3. L'amusie congénitale	16
1.3.1. La musique dans le développement normal	16
1.3.2. Définition de l'amusie congénitale	17
1.3.3. Prévalence et diagnostic	18
1.3.4. Étude comportementale	20
1.3.5. Étiologie et corrélats neuronaux	21
1.3.5.1. Le caractère héréditaire	21
1.3.5.2. Anomalies corticales et sous-corticales	22
1.3.5.3. Profils de potentiels évoqués	24
2. Objectifs et hypothèses	31
3. Méthodologie et résultats	34
3.1. Article I	35

3.2. Article II	77
4. Discussion générale	109
4.1. La MMN avec la trame sonore d'un film	111
4.1.1. Les effets de la trame sonore d'un film sur la MMN	111
4.1.2. Un effet attentionnel de la trame sonore?	114
4.1.3. Un effet d'interférence acoustique	117
4.1.4. Limites méthodologiques	119
4.1.5. Directions futures	121
4.2. L'Amusie congénitale	123
4.2.1. La MMN dans l'amusie congénitale	124
4.2.2. La P3b chez les amusiques	125
4.2.3. Les corrélats neuronaux de l'amusie congénitale.....	127
4.2.4. Percevoir sans en avoir conscience.....	129
4.2.5. Limites méthodologiques.....	130
4.2.6. Directions futures.....	132
5. Conclusion	135

Liste des tableaux

Article II

Tableau 1.	Characteristics of the participants, global percentage score on the Montreal Battery of Evaluation of Amusia (MBEA) with standard deviations calculated relative to the controls' mean score in parentheses	103
Tableau 2.	Average number of sounds presented and detected by seven amusics and their seven yoked controls in the Attend condition for the standard tone, the 25 and the 200 cents pitch differences. False alarms correspond to a “yes, there was a change” for standard sequences (which contain no change). Standard deviations are in parentheses	104

Liste des figures

Introduction

Figure 1.	La négativité de discordance (MMN) [Adaptée de Kujala & Näätänen, 2001]	9
-----------	-------------------------------------------------------------------------	---

Méthodologie et résultats

Article I

Figure 1.	Experiment 1: (a) Average responses to the standard tone and to the 50 cents and 300 cents pitch differences (top) and MMN difference waves (bottom) for the 50 cents and 300 cents pitch differences obtained at the electrode Fz in each soundtrack condition: With Movie Soundtrack (left) and No Soundtrack (right). (b) MMN obtained for the 50 cents and 300 cents pitch differences at other scalp locations in each soundtrack condition: With Movie Soundtrack (left) and No Soundtrack (right)	73
Figure 2.	MMN difference waves in Experiment 1 (a), Experiment 2 (b) and Experiment 3 (c), for the 300 cents pitch difference obtained at the electrode Fz and at the left mastoid after re-referencing the data to a whole head average reference including all electrodes except EOG channels	74
Figure 3.	Experiment 2: (a) Average responses to the standard tone and to the 50 cents and 300 cents pitch differences (top) and MMN difference waves (bottom) for the 50 cents and 300 cents pitch differences obtained at the electrode Fz in each soundtrack condition: With Backward Soundtrack (left) and No Soundtrack (right). (b) MMN obtained for the 50 cents and 300 cents pitch differences at other scalp locations in each soundtrack condition: With Backward Soundtrack (left) and No Soundtrack (right)	75

Figure 4. Experiment 3: (a) Average responses to the standard tone and to the 50 cents and 300 cents pitch differences (top) and MMN difference waves (bottom) for the 50 cents and 300 cents pitch differences obtained at the electrode Fz in each of the intensity level conditions: + 7 dB difference (left) and + 15 dB difference (right). (b) MMN obtained for the 50 cents and 300 cents pitch differences at other scalp locations in each of the intensity level conditions: + 7 dB difference (left) and + 15 dB difference (right) 76

Article II

Figure 1. a) Grand average ERP waves obtained for the standard sound and the 25 and 200 cents pitch changes (upward and downward) for the amusic and control subjects at Fz. b) MMN difference waves (deviant minus standard) for de 25 cents and 200 cents pitch changes (upward and downward) for amusics and controls at Fz. c) Individual MMN amplitudes for the 25 and 200 cents pitch differences (upward and downward) for amusics and controls. Dashed lines indicate a downward pitch change, solid lines an upward pitch change and the standard in their respective colors (green for 200 cents; red for 25 cents and black for the standard) 106

Figure 2. a) Scalp Voltage maps for the 200 pitch difference in MMN; b) for the P3b; c) for the N1 in the ignore condition; d) for the N1 in the attend condition 107

Figure 3. Grand average ERP waves obtained in the pitch change detection task in the attend condition for the standard tone as well as the 25 and 200 cents pitch differences (upward and downward) in the amusics and the controls at Cz 108

Figure 4. Grand average ERP waves obtained for the first 1080 standard tones in the ignore condition (left panel) and the attend condition (right panel) for the amusics and the controls at Cz 108

Liste des sigles et abréviations

ANOVA	<i>Analysis of variance / Analyse de la variance</i>
DTT	<i>Distorted Tune Test</i>
EEG	Électroencéphalographie / <i>Electroencephalography</i>
EOG	Électrooculographie / <i>Electrooculogram</i>
ERP	<i>Event-related potential</i>
FFR	Réponse d'adoption de fréquence / <i>Frequency following response</i>
fMRI	<i>Functional magnetic resonance imaging</i>
Hz	Hertz
IRMf	Imagerie par résonance magnétique fonctionnelle
MBEA	Batterie montréalaise d'évaluation de l'amusie / <i>Montreal battery of evaluation of amusia</i>
MMN	Négativité de discordance / <i>Mismatch negativity</i>
MS	Millisecondes / <i>Milliseconds</i>
SL	Niveau de sensation / <i>Sensation level</i>
SPL	Niveau de pression acoustique / <i>Sound pressure level</i>
TEP	Tomographie par émission de positron
VBM	Voxel based morphometry
μV	Microvolt

*À mes parents, Pierre Moreau (1953-2000) et
Francine Beauregard*

Remerciements

Cette grande aventure, qui tire aujourd'hui à sa fin, a débuté par une rencontre inespérée avec une femme qui aura changé le cours de ma vie, Mme Isabelle Peretz, ma directrice de recherche. Il y a déjà bientôt huit années de cela, elle m'a fait l'immense honneur de m'accorder sa confiance, en m'accueillant en tant qu'étudiante à la maîtrise au sein de son laboratoire de recherche, ce qui a marqué le début d'une longue et fructueuse collaboration. Je ne peux que la remercier de m'avoir accompagnée tout au long de ces longues années, me prodiguant de judicieux conseils, m'encourageant à dépasser mes limites et m'éveillant au monde fabuleux de la recherche. Elle a également fait preuve de patience à travers les embûches, les grossesses et les changements de parcours. Ce fut un plaisir de travailler à ses côtés et je ne la remercierai jamais assez de tout ce qu'elle m'a permis d'accomplir.

Lors de mon passage accéléré au Ph.D. recherche en psychologie, mon chemin a également croisé celui d'un homme que j'estime beaucoup, M. Pierre Jolicoeur, qui s'est joint à l'équipe en tant que co-directeur de mes recherches. Ses capacités d'analyse approfondie des problématiques d'électrophysiologie ont été pour moi un phare, m'éclairant dans ce long processus d'apprentissage des potentiels évoqués. Chacune de nos rencontres a été riche en réflexion et m'a permis de progresser davantage, m'aidant à forger mon jugement et mon esprit critique. Je tiens donc à le remercier pour tous ses commentaires constructifs et sa patience dans le long processus ayant mené à la rédaction de cette thèse. Son apport à mon cheminement est indéniable.

Par ailleurs, il appert de mentionner toutes les personnes qui ont fait de mon cheminement un succès, me prodiguant de l'aide et des encouragements à de nombreuses reprises. À cet effet, je dois absolument remercier tout le personnel du BRAMS et, plus particulièrement, M. Bernard Bouchard dont la patience est infinie et les ressources innombrables, Mme Mihaela Felezeu qui m'a si bien soutenue au laboratoire de ERP, Mme Manon Robert qui m'a appris tous les secrets techniques des ERP et Olivier Piché, le maître incontesté des solutions informatiques. Je tiens aussi à remercier mes collègues du BRAMS avec une mention spéciale pour Pascale Lidji qui m'a tant aidée et fait rire, Marie-Andrée

Lebrun qui met toujours un brin de joie dans mes journées et Nathalie Gosselin qui m'a patiemment endurée au cours des premières années où je l'ai bombardée de questions.

Enfin, je ne pourrais terminer mes remerciements sans parler de ma famille. Merci à mon père et ma mère d'avoir cru en moi et de m'avoir soutenue si longtemps. Vous m'avez permis de croire que les rêves se réalisent si on y met du sien. Papa, tu auras été une source d'inspiration même après ton décès et maman, tu as été tellement présente, me réchauffant le cœur et me donnant le courage de poursuivre. Merci à l'homme de ma vie, Yannick St-Georges, d'être demeuré à mes côtés à travers vents et marées, d'avoir écouté avec patience toutes mes élucubrations et angoisses existentielles et de m'avoir accompagnée dans cette grande aventure à travers laquelle nous avons eu nos deux beaux amours : Isaac et Ellia. Merci à ma grande sœur, Marie-Ève Moreau, d'avoir été une source d'inspiration à sa manière par ses grands projets et ses ambitions. Également merci à ma belle-famille pour leur aide infinie, leur support et leur compréhension. Finalement, merci à tous mes amis pour m'avoir donné tant de joie, même dans les moments les plus difficiles. À vous tous, merci d'être là et de m'aider à surpasser mes limites tout en demeurant simplement moi.

1. Introduction

1.1. Introduction générale

La musique est omniprésente et source de plaisir. Dès sa naissance, l'humain démontre des aptitudes musicales complexes et rapidement acquises sans un apprentissage explicite. Cependant, il semblerait que malgré une exposition normale à la musique, certains individus n'acquièrent pas les habiletés nécessaires au traitement de cette dernière. Cette condition particulière fut nommée de diverses manières telles que "tone deafness" (Fry, 1984) ou "dysmelodia" (Kalmus & Fry, 1980), mais c'est récemment sous le nom d'amusie congénitale qu'elle fut plus systématiquement étudiée (Peretz, 2001). On estime que 4% de la population serait au prise avec l'amusie congénitale (Kalmus & Fry, 1980), soit un nombre non négligeable d'individus n'étant pas à même d'apprécier ou de produire de la musique, ce qui justifie l'importance de mener des travaux de recherche afin d'approfondir notre compréhension des mécanismes neuronaux sous-jacents à cette condition propre à la musique.

Un nombre croissant de recherches portant sur l'amusie congénitale a permis de clarifier la nature des difficultés rencontrées par les amusiques comme provenant d'un déficit de la perception fine des hauteurs (Hyde & Peretz, 2004). Des études subséquentes d'imagerie cérébrale ont également contribué à identifier des anomalies cérébrales associées à ce déficit de discrimination tonale dans la matière blanche et la matière grise (Hyde, Zatorre, Griffiths, Lerch & Peretz, 2006; Hyde, Lerch, Zatorre, Griffiths, Evans & Peretz, 2007; Loui, Alsop & Schlaug, 2009), et ont également mis en lumière une connectivité anormale entre les aires cérébrales temporales et frontales (Hyde, Zatorre & Peretz, 2011). Les recherches en potentiel évoqué ont, pour leur part, contribué à démontrer que le cerveau des amusiques produit des réponses électrophysiologiques anormales face à de petites différences de hauteur, tel que

révélé par l'absence d'une composante de potentiel évoqué associée à des processus tardifs et conscients de détection de la nouveauté et à l'attention (Peretz, Brattico & Tervaniemi, 2005). En ce qui a trait aux processus précoces de détection de différences de hauteur, à ce jour, très peu d'études de potentiel évoqué se sont penchées sur la capacité du cerveau des amusiques à discriminer les petites différences de hauteur à un niveau préconscient, et les résultats apparaissent contradictoires (ex., Braun et al., 2008; Peretz, Brattico, Jarvenpaa & Tervaniemi, 2009). Ainsi, afin de clarifier la dynamique complexe sous-jacente au déficit de discrimination tonale fine retrouvé chez les amusiques, il s'avérerait essentiel de conduire de nouvelles études. Celles-ci permettront de statuer sur les processus précoces et inconscients de détection des différences de hauteur dans la musique.

À cet effet, la composante de potentiel évoqué connue sous le nom de négativité de discordance (*mismatch negativity* en anglais; MMN) s'avère tout à fait appropriée. Cette composante est reconnue pour refléter la détection préconsciente de différences à l'intérieur d'une séquence régulière et répétitive de stimuli. Cette composante de potentiel évoqué est d'autant plus intéressante puisque le paradigme expérimental visant à l'induire ne requiert pas l'attention des participants, ces derniers pouvant s'adonner à d'autres activités telles que lire un livre ou regarder un film muet pendant la présentation des stimuli. Dans certaines études, on a parfois même autorisé les participants à regarder un film avec la bande sonore pendant qu'on leur présentait simultanément les stimuli expérimentaux (ex., Bellis, Nicol & Kraus, 2000; Bradlow, Kraus, Nicol, Cunningham, Zecker & Carrell, 1999; Hayes, Warrier, Nicol, Zecker & Kraus, 2003; Kraus, Koch, McGee, Nicol & Cunningham, 1999; McGee, King, Tremblay, Nicol, Cunningham & Kraus, 2001; Starratt & Nash, 2004; Todd, Michie, Schall,

Karayanidis, Yabe & Näätänen, 2008; Tremblay, Kraus, Carrell & McGee, 1997). Les rares études qui se sont intéressées aux effets de la présentation d'une trame sonore de film en concurrence avec les stimuli auditifs ont toutefois démontré une réduction significative de la MMN (McArthur, Bishop & Proudfoot, 2003; Mahajan & McArthur, 2011), sans néanmoins clarifier la raison de cette diminution.

C'est dans ce contexte que les travaux de recherche de la présente thèse ont été élaborés avec comme premier objectif d'étudier la nature des modifications constatées sur la MMN lorsque la bande sonore d'un film est présentée, en vue, dans un second temps, d'optimiser le paradigme expérimental visant à étudier cette même composante chez les amusiques. Les résultats de ces travaux ont mené à la réalisation de deux articles de recherche qui sont présentés dans la seconde section de cet ouvrage et discutés ensuite dans la troisième section. Débutons d'abord par une introduction sur la MMN et les enjeux associés à la présentation d'une trame sonore, qui sera suivie par une description de l'amusie congénitale et ses corrélats neuronaux connus à ce jour.

1.2. La négativité de discordance

1.2.1. Définition de la négativité de discordance

La négativité de discordance est une composante de potentiel évoqué mieux connue dans la littérature sous son nom anglais de *mismatch negativity*. Tout au long du présent manuscrit, nous référerons à la négativité de discordance par son acronyme largement utilisé dans le domaine des potentiels évoqués, soit la MMN. La MMN est une déflexion négative

qui survient au cours des 100 à 250 millisecondes après qu'un changement sonore ait été présenté au sein d'une séquence de sons répétitifs et homogènes, qu'on nomme communément les sons standards (Tiitinen, May, Reinikainen & Näätänen, 1994). Dans le paradigme de stimulus discordant classiquement utilisé pour évoquer la MMN, il est essentiel que la probabilité d'occurrence des sons déviants soit bien inférieure à celle des sons standards. La MMN peut être observée et mesurée comme étant la différence entre la courbe de potentiel évoqué obtenue pour les sons standards et les courbes obtenues pour les sons déviants. Cette composante de potentiel évoqué est reconnue pour être un indice sensible de détection de changements dans les propriétés physiques des sons présentés et peut être évoquée tant par des différences de fréquence ou d'intensité du son que par un changement dans l'intervalle inter-stimulus (Näätänen & Winkler, 1999; pour une revue critique voir May & Tiitinen, 2010).

1.2.2. La MMN avec la trame sonore d'un film

Dans le paradigme expérimental classiquement utilisé pour évoquer la MMN, on demande généralement aux participants d'ignorer la stimulation auditive visant à induire la MMN et de diriger leur attention vers une tâche de distraction telle que la lecture d'un livre ou le visionnement d'un film silencieux et sous-titré. Par ailleurs, dans le cadre de plusieurs études, des chercheurs ont choisi de présenter la trame sonore d'un film à faible intensité sonore (40 à 50 dB SPL) en simultané à la stimulation auditive visant à évoquer la MMN (ex., Bellis et al., 2000; Bradlow et al., 1999; Hayes et al., 2003; Kraus et al., 1999; McGee et al., 2001; Starratt et al., 2004; Todd et al., 2008; Tremblay et al., 1997). La présentation de la trame sonore du film représente un avantage méthodologique intéressant. De fait, cela permet

de faciliter l'évaluation de certaines populations, telles que les jeunes enfants ne sachant pas encore lire, les illettrés, ou encore certaines populations cliniques, et de rendre plus agréable les sessions d'enregistrement qui sont souvent longues et ennuyeuses. Toutefois, les études ayant présenté une trame sonore de film pendant l'enregistrement de la MMN n'ont pas investigué les effets possibles que cela pouvait avoir sur cette même composante de potentiel évoqué.

McArthur et al. (2003) furent les premiers à se pencher sur les effets de la trame sonore d'un film sur la MMN. Ils ont présenté une stimulation auditive, visant à évoquer la MMN, de manière bilatérale à une intensité de 80 dB SPL. Les stimuli consistaient en un son standard d'une fréquence de 700 Hz et un son déviant de 600 Hz, dont la durée était de 125 millisecondes avec un intervalle inter-stimulus de 200 ou 320 millisecondes. Les participants devaient ignorer les stimuli et se concentrer sur la présentation d'un film silencieux avec les sous-titres dans une condition, et avec la trame sonore présentée à faible intensité (50 dB SPL) dans l'autre condition. Les résultats de cette étude ont démontré une réduction significative de l'amplitude de la MMN lorsque la trame sonore du film est présentée, ce qui fut corroboré par Mahajan et McArthur (2011) auprès d'une population d'enfants. Bien qu'il ait été démontré que la présentation de la trame sonore d'un film a un effet significatif sur l'enregistrement de la MMN en diminuant son amplitude, à ce jour, aucune étude ne s'est encore penchée sur la nature exacte de l'effet de la trame sonore sur la MMN. Ainsi, avant de se lancer dans l'utilisation d'un tel paradigme expérimental, il apparaît essentiel d'investiguer la raison précise des altérations constatées sur l'amplitude de la MMN avec la trame sonore d'un film afin de s'assurer que les caractéristiques de base de la MMN, de même que ses mécanismes

générateurs, demeurent les mêmes. En ce sens, il appert d'abord de nous familiariser avec les mécanismes sous-jacents à l'évocation de la MMN.

1.2.3. Mécanisme d'évocation de la MMN

1.2.3.1. Origine fonctionnelle de la MMN

Selon le modèle proposé par Näätänen (1990), l'apparition de la MMN dépend de la formation d'une trace sensori-mémorielle du son standard qui se forge au fur et à mesure que ces derniers sont présentés. Lorsqu'un son déviant survient, il est comparé à la trace mémorielle du son standard et, s'il est détecté comme étant différent, alors le mécanisme générateur de la MMN est activé. Plus récemment, la MMN a plutôt été décrite comme représentant une réponse à une violation au sein d'une régularité auditive, telle qu'un changement des caractéristiques physiques d'un son standard répétitif (Winkler, 2007). En outre, la répétition du son standard génère une forme de régularité auditive à laquelle est comparé chaque nouveau son. Si un son brise la règle de régularité établie, la MMN est alors évoquée. Par ailleurs, il importe également de mentionner que certains auteurs argumentent que, dans le paradigme classique utilisé pour évoquer la MMN, il est possible que la composante qui est interprétée comme étant une MMN ne soit en fait qu'une N1 (May & Tiitinen, 2010). La N1 est une déflexion négative qui survient en moyenne dans les 100 ms suivant la présentation d'un son, quel qu'il soit, et n'est pas associée au processus de détection de changements mais plutôt à l'encodage des propriétés physiques des sons (Näätänen, 1992). Avec la répétition des sons standards, les neurones générateurs de la N1 deviennent progressivement plus réfractaires, s'étant habitués à la présentation répétée. Pour leur part, les

neurones sensibles à la fréquence des sons déviants sont moins réfractaires, ayant été moins sollicités, de telle sorte que la réponse neuronale observée en réponse à une différence sonore sera plus ample comparativement à celle des sons standards. Ainsi, lors de la comparaison de la courbe standard avec les courbes obtenues pour les déviants, il est possible que la déflexion négative plus ample observée pour les sons déviants ne soit en fait attribuable qu'à la N1. Il s'agit d'un point important qui fait l'objet d'un chaud débat quant à l'existence ou non et à l'origine de la MMN et qu'il convient de garder à l'esprit en étudiant la MMN. Toutefois, tout au long de cette thèse, nous référerons uniquement à la MMN et à la N1 en tant que composantes de potentiel évoqué distinctes. En effet, nous considérons la MMN comme une composante qui se distingue de la N1, de même que d'autres composantes que nous aborderons plus tard, tant par sa topographie que ses générateurs neuronaux, qu'il apparait maintenant pertinent d'aborder.

1.2.3.2. Générateurs neuronaux de la MMN

Plusieurs études se sont intéressées aux générateurs neuronaux de la MMN. Näätänen et Alho (1995) ont suggéré que le mécanisme d'évocation de la MMN reflèterait l'activation de populations neuronales dans les lobes cérébraux temporaux et, plus récemment, Deouell (2007) aurait aussi retracé des sources neuronales de la MMN dans les aires frontales, responsables d'un détournement automatique de l'attention en direction du son déviant perçu. Ainsi, lorsque les générateurs neuronaux frontaux et temporaux sont activés, la MMN peut alors être observée sous la forme d'une déflexion négative ayant une topographie fronto-centrale sur le scalp (voir Figure 1), avec une amplitude maximale à Fz, et caractérisée par une inversion du signal observé aux mastoïdes (Tiitinen et al., 1994).

The Mismatch Negativity (MMN)

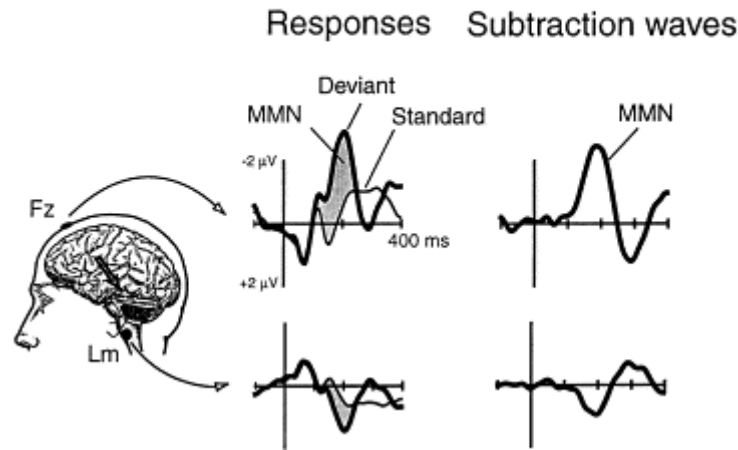


Figure 1. La négativité de discordance (MMN)

[Adaptée de Kujala & Näätänen, 2001]

1.2.4. Facteurs pouvant influencer la MMN

1.2.4.1. Les effets de l'attention sur la MMN

Selon le modèle d'évocation de la MMN de Näätänen (1990), la détection des changements dans les propriétés physiques des stimuli s'effectuerait de manière automatique et inconsciente, sans que le participant ne doive porter attention à la stimulation auditive. Néanmoins, les dernières décennies ont été marquées par un chaud débat quant aux effets de l'attention sur la MMN, certains argumentant qu'il s'agit d'un processus indépendant des mécanismes attentionnels alors que d'autres ont tenté de démontrer que la MMN peut effectivement être altérée par des manipulations attentionnelles (pour une revue critique, voir Sussman, 2007). Il s'agit là d'un débat qui soulève un important questionnement quant aux effets de la trame sonore sur l'enregistrement de la MMN. De fait, lorsqu'un participant

visionne un film silencieux sous-titré, on peut supposer que son attention est principalement dirigée vers l'information visuelle distrayante qui lui est transmise et non pas vers les sons répétitifs et ennuyeux qui lui sont présentés simultanément. En revanche, lorsque la trame sonore d'un film est présentée, l'attention du participant sera à nouveau attirée vers le contenu visuel du film, mais aussi vers la modalité auditive, dans laquelle on retrouve à la fois le contenu de la trame sonore, qui est nécessaire à la compréhension du film sans les sous-titres, et la stimulation auditive visant à évoquer la MMN. On peut donc imaginer qu'une part de l'attention du participant sera inévitablement aussi dirigée vers les stimuli. Dans ce contexte, il apparaît pertinent d'envisager que l'attention pourrait jouer un rôle important dans la diminution d'amplitude constatée sur la MMN lorsqu'elle est enregistrée avec la trame sonore d'un film. En ce sens, il apparaît donc nécessaire d'approfondir notre compréhension des effets de l'attention sur la MMN afin d'évaluer si cette dernière constitue un facteur d'importance dans la diminution d'amplitude constatée sur la MMN avec la présentation de la trame sonore d'un film.

Les premières études s'étant intéressées aux effets de l'attention sur la MMN ont principalement fait usage de paradigmes d'écoute sélective dichotique. En outre, on présentait des sons visant à évoquer la MMN dans les deux oreilles et on demandait aux participants d'ignorer l'information auditive présentée dans une oreille et de porter attention aux stimuli présentés dans l'autre oreille, par exemple en comptant les sons. Il est ainsi possible de mesurer simultanément deux MMN, soit l'une pour les stimuli auxquels le participant ne porte pas attention et l'autre pour les sons auxquels le participant a porté attention. Les résultats ont démontré que les changements au sein de la stimulation auditive évoquaient des MMN

comparables, indépendamment du fait que le participant porte attention ou pas aux sons (Näätänen, Gaillard & Mäntysalo, 1978, 1980). Toutefois, ces résultats ont été critiqués, Woldorff et Hillyard (1990) argumentant que le fait de compter des sons n'est pas une tâche très exigeante et qu'en conséquence, une certaine part de l'attention pourrait être détournée vers les sons devant être ignorés. À cet effet, Woldorff, Hackley et Hillyard (1991) ont suggéré que les sons devraient être présentés à un rythme beaucoup plus rapide au sein d'une tâche exigeante afin de s'assurer d'être bien en mesure de maintenir l'attention mobilisée sur les sons présentés dans une seule oreille. Suite à ces recommandations, de nombreuses autres études ont démontré que l'attention peut effectivement influencer l'enregistrement de la MMN, tel que révélé par une réduction de l'amplitude de la MMN dans la condition où le sujet ne porte pas attention aux stimuli (Alain & Woods, 1997; Näätänen, Paavilainen, Tiitinen, Jiang & Alho, 1993; Oades & Dittmann-Balcar, 1999; Woldorff et al., 1991).

Toutefois, ces résultats ont également été critiqués par Näätänen (1991) qui a soulevé le fait que la différence d'amplitude de la MMN constatée entre les conditions où l'attention du participant est ou n'est pas dirigée vers les stimuli pourrait être attribuable à une autre composante de potentiel évoqué appelée la N2b. La N2b est une déflexion négative qui est observée en réponse à un son déviant présenté au sein d'une séquence répétitive de sons standards lorsque le participant porte attention à la stimulation auditive présentée (en contraste avec la MMN qui ne nécessiterait pas d'attention). Elle est caractérisée par une topographie centrale, avec une amplitude maximale à l'électrode Cz, et se distingue aisément de la MMN par le fait qu'elle ne présente pas d'inversion du signal aux mastoïdes. Elle est toutefois superposable à la MMN d'un point de vue temporel, la N2b étant observée dans la même

fenêtre que la MMN. Il est donc possible que l'amplitude de la N2b s'additionne à celle de la MMN dans la condition où le participant porte attention, menant ainsi à l'interprétation erronée d'une MMN de plus grande amplitude.

Ainsi, dans le but d'éviter le problème posé par la superposition de la N2b à la MMN, les chercheurs ont demandé aux participants d'ignorer la stimulation auditive visant à évoquer la MMN et de concentrer leur attention sur une tâche de diversion visuelle. L'attention étant ainsi détournée de la modalité auditive, où les sons critiques de la MMN sont présentés, il est alors peu probable que la N2b soit évoquée et qu'elle contamine les mesures de la MMN. Dans ce contexte, la difficulté de la tâche de distraction visuelle a été utilisée pour évaluer les effets de l'attention sur la MMN. De fait, il a été postulé qu'une tâche visuelle dont le niveau de difficulté est très élevé mobilisera efficacement les ressources attentionnelles, de telle sorte que très peu ou aucune ressource attentionnelle résiduelle ne pourra être détournée vers la modalité auditive. En revanche, une tâche plus facile n'accaparera pas la totalité des ressources et une part non négligeable de l'attention pourra alors être détournée vers les stimuli auditifs. Dans les études visant à étudier les effets de l'attention sur la MMN par l'entremise de tâches de diversions, les participants devaient généralement effectuer des tâches de discrimination visuelle de stimuli, le degré de difficulté étant contrôlé par la manipulation du niveau de différenciation des cibles par rapport aux distracteurs visuels. Les résultats de plusieurs études n'ont révélé aucun effet du niveau de difficulté de la tâche, et donc de l'attention sur la MMN (Alho, Woods, Algazi & Näätänen, 1992; Dittmann-Balcar, Thienel & Schall, 1999; Harmony et al., 2000; Kathmann, Frodl-Bauch & Hegerl, 1999; Muller-Gass, Stelmack & Campbell, 2006; Otten, Alain & Picton, 2000). Seulement quelques rares études

ont démontré des effets significatifs sur la MMN avec des résultats contradictoires, Kramer, Treho et Humphrey (1995) de même que Yucel, Petty, McCarthy et Belger (2005) ayant constaté une réduction d'amplitude de la MMN avec l'augmentation du niveau de difficulté, alors que Zhang, Xiangchuan, Yuan, Zhang et Sheng (2006) ont constaté une augmentation d'amplitude de la MMN pour le niveau de difficulté le plus élevé. Somme toute, ces résultats ne permettent pas de clarifier les effets de l'attention sur la MMN et n'avancent pas d'explication quant aux mécanismes générateurs de la MMN qui pourraient être affectés.

Plus récemment, Sussman (2007) a offert une nouvelle approche face au débat concernant les effets de l'attention sur la MMN en proposant que l'attention n'influence pas le mécanisme générateur de la MMN dans sa globalité, mais interfère plus spécifiquement avec le processus de formation de la trace sensori-mémorielle du son standard. En outre, Sussman soutient que le processus de formation de la trace mémorielle du standard est crucial au mécanisme d'évocation de la MMN, la détection des changements étant entièrement dépendante de ce dernier, et que ce processus peut être influencé par divers facteurs, dont l'attention. Les effets de l'attention ont d'ailleurs déjà été observés, notamment dans des circonstances où les participants devaient discriminer des différences de hauteur au sein d'une stimulation auditive (Sussman, Ritter & Vaughan, 1998a), ou encore devaient détecter des motifs séquentiels à l'intérieur d'un flot de sons (Sussman, Winkler, Huotilainen, Ritter & Näätänen, 2002).

À ce jour, il n'existe toujours pas de consensus quant aux effets de l'attention sur l'enregistrement de la MMN. Par ailleurs, le paradigme expérimental selon lequel on présente

la trame sonore d'un film en simultané aux stimuli auditifs visant à évoquer la MMN pourrait offrir une nouvelle possibilité d'explorer les effets de l'attention sur la MMN. Néanmoins, il importe également de considérer que la présentation de la trame sonore d'un film ne contribue peut-être pas uniquement à faire varier le niveau d'attention dirigée vers les stimuli auditifs visant à évoquer la MMN, mais agit peut-être aussi comme un bruit riche en contenu spectral et en variations d'intensité sonore qui est susceptible de générer de l'interférence acoustique avec les sons visant à évoquer la MMN. Ainsi, il faut prendre en compte cette autre hypothèse afin d'investiguer tous les effets possibles pouvant expliquer la réduction d'amplitude constatée lorsqu'on présente la trame sonore d'un film. À cet effet, il existe une littérature scientifique relativement étendue concernant les effets d'interférence acoustique sur la MMN qu'il est à présent nécessaire d'aborder.

1.2.4.2. Les effets d'interférence acoustique sur la MMN

La trame sonore d'un film est constituée d'un éventail complexe de sons, de musique et de langage qui s'amalgament de manière irrégulière dans des changements constants d'intensité sonore. Lorsque les participants sont autorisés à écouter la trame sonore d'un film en simultané à la stimulation auditive visant à évoquer la MMN, ces mêmes sons se retrouvent alors imbriqués à l'intérieur d'une scène auditive riche qui risque d'interférer avec l'encodage des sons cruciaux à l'activation du mécanisme d'évocation de la MMN. De fait, il est possible que la richesse du contenu spectral de la trame, associé notamment au contenu sémantique découlant des divers dialogues, génère une interférence avec les fréquences des sons choisis pour évoquer la MMN dans le paradigme expérimental. À cet effet, un certain nombre

d'études a démontré que la MMN peut être affectée par la présentation de diverses sortes de bruits sonores en simultané aux sons visant à évoquer la MMN. De fait, la MMN s'est révélée comme étant nettement moins bien enregistrée et de plus faible amplitude lorsque les bruits utilisés se rapprochaient de sons naturels, tels que des bruits de fête, de la musique ou encore le bruit du trafic (Kozou et al., 2005; Levänen & Mikko, 1997), et tout particulièrement lorsque les fréquences des bruits sonores, quel qu'ils soient, avoisinaient ou correspondaient à celles des sons visant à évoquer la MMN (Martin & Stapells, 2005; Martin, Kurtberg & Stapells, 1999). Enfin, nonobstant la fréquence ou la valeur écologique des bruits utilisés, certaines études ont également démontré que la simple interférence acoustique suffisait à diminuer l'amplitude de la MMN. En effet, peu importe la nature du bruit utilisé, plus l'intensité sonore du bruit augmentait, plus il était difficile d'enregistrer la MMN, son amplitude diminuant proportionnellement à l'augmentation du rapport d'intensité du bruit par rapport à l'intensité des sons visant à évoquer la MMN (Muller-Gass, Marcoux, Logan & Campbell, 2001).

En somme, bien que la trame sonore puisse représenter un atout de taille pour l'étude de la MMN chez certaines populations ou simplement afin d'alléger et de faciliter le long processus d'enregistrement de cette composante, les études effectuées à ce jour n'ont pas encore permis de clarifier l'origine des effets constatés sur la MMN lors de la présentation de la trame sonore d'un film. De fait, il est possible que la trame sonore du film affecte la MMN par l'entremise d'un effet attentionnel ou encore que la réduction d'amplitude observée soit attribuable à de l'interférence acoustique. En considérant le fait que ce paradigme est déjà utilisé par quelques chercheurs, sans que ces derniers ne tiennent compte de l'effet de la trame

sonore dans leur interprétation des résultats, il apparait donc pertinent de clarifier l'origine de la diminution d'amplitude de la MMN afin de permettre de nuancer adéquatement les résultats obtenus en utilisant ce paradigme. Par ailleurs, une meilleure compréhension de l'effet en cause dans la réduction d'amplitude de la MMN, observée avec la trame sonore d'un film, pourrait également permettre de bien cerner les paramètres expérimentaux à ajuster afin de garantir l'efficacité d'un tel paradigme. Cela permettra de tirer des conclusions fiables et valides lors de l'étude de cette composante de potentiel évoqué chez les amusiques, qui constituent la population ciblée par les présents travaux de recherche.

1.3. L'amusie congénitale

1.3.1. La musique dans le développement normal

La musique est universelle et accessible à tous sous de nombreuses formes. L'humain y est exposé dès les premiers jours de sa vie et souvent même avant sa naissance par les sons qui pénètrent l'espace intra-utérin. Avant même d'entamer leurs premières expériences linguistiques, les enfants de moins d'un an démontrent d'étonnantes capacités musicales comparables à celles des adultes matures, tant au niveau du traitement des hauteurs tonales qu'en ce qui a trait à la perception du rythme. Notamment, on observe chez les bébés de six à neuf mois des aptitudes à discriminer les intervalles musicaux consonants des intervalles dissonants (Schellenberg & Trehub, 1996). On constate également chez des bébés aussi jeunes que quatre mois, une préférence pour la régularité rythmique dans la musique, telle que révélée par une sensibilité aux petites variances temporelles (Drake, 1998). Les enfants semblent donc naître avec des prédispositions envers la musique (Trehub, 2001) qui, tout

comme pour les aptitudes associées au langage, semblent se distinguer particulièrement par leur caractère universel. Cette propension innée envers la musique conduit ultimement au développement d'un système sophistiqué propre au traitement de cette dernière.

1.3.2. Définition de l'amusie congénitale

Malgré une exposition normale à la musique dès la naissance, certains individus semblent néanmoins éprouver de la difficulté à l'apprécier et la produire, n'ayant apparemment pas développé les habiletés essentielles au traitement de musique. Cette condition particulière a fait l'objet de nombreuses études visant à élucider la nature des difficultés musicales rencontrées, de même que leur étiologie. De fait, dans la littérature, cette condition propre à la musique fut décrite et nommée de diverses manières telles que « note-deafness » (Allen, 1878), « tone deafness » (Fry, 1948), « tune deafness » ou « dysmelodia » (Kalmus & Fry, 1980). C'est récemment sous le nom d'amusie congénitale qu'elle fut plus systématiquement étudiée (Peretz, 2001). L'amusie congénitale est un terme général faisant référence à une incapacité à acquérir des connaissances de base en musique, et ce malgré une ouïe, une intelligence et des aptitudes langagières normales de même qu'en l'absence d'atteintes cérébrales. Le terme *amusie* englobe plusieurs formes d'amusies congénitales, qui s'apparentent aux diverses variations constatées pour les amusies acquises suite à des dommages cérébraux (Stewart, Von Kriegstein, Warren & Griffiths, 2006). Ce terme fait toutefois généralement référence à la forme la plus connue d'amusie qui est caractérisée par des difficultés de traitement des hauteurs dans la musique. Pour sa part, le terme *congénitale*

réfère au fait qu'il s'agit d'une condition qui est présente dès la naissance (Peretz, sous presse), et non pas à l'étiologie de cette dernière.

1.3.3. Prévalence et diagnostic

Les premières études ayant tenté d'établir la prévalence de l'amusie congénitale dans la population générale ont fait usage d'un outil diagnostique du nom de *Distorted Tune Test* (DTT), lequel visait à évaluer la capacité des participants à mémoriser des extraits musicaux populaires et à détecter si de fausses notes avaient été introduites dans ces derniers. Un participant était considéré amusique s'il commettait trois erreurs ou plus au test. Les résultats de cette étude ont permis d'établir qu'on pouvait estimer qu'environ 4% de la population générale serait atteinte d'amusie congénitale (Kalmus & Fry, 1980).

Pendant de longues années, cette approximation de la prévalence de l'amusie a prévalu dans la littérature, jusqu'à tout récemment avec l'émergence d'un nouvel outil d'évaluation de l'amusie beaucoup plus complet et connu sous le nom de la Batterie montréalaise d'évaluation de l'amusie (MBEA; Peretz, Champod & Hyde, 2003). Ce test est dorénavant reconnu comme un outil valide et efficace de diagnostic de l'amusie. La MBEA est composée de six sous-tests visant à évaluer les aptitudes à traiter l'information mélodique (hauteur, contour et intervalle) et temporelle (rythmique et métrique) dans la musique, de même qu'un sixième sous-test portant sur la mémoire musicale. Afin qu'un individu soit considéré comme étant amusique, il doit obtenir un score global à la MBEA se retrouvant à deux écart-types sous la moyenne des participants normaux. Toutefois, la MBEA est un test long à administrer, ce qui ne facilite pas l'évaluation d'un grand nombre de personnes tel qu'effectué dans les études de prévalence.

C'est pourquoi Peretz, Cummings et Dubé (2007) ont créé une version abrégée et modifiée de la MBEA et l'ont rendue disponible sur Internet afin de compiler rapidement les résultats d'un grand nombre de participants. Ce nouvel outil diagnostique abrégé, composé d'un test de détection d'incongruités mélodiques et d'une condition contrôle basée sur des incongruités temporelles, a d'ailleurs démontré son efficacité à diagnostiquer l'amusie aussi efficacement que la MBEA (Peretz et al., 2008). Dans une première étude, Peretz et al. (2007) ont ainsi pu démontrer qu'environ 3% de la population générale serait atteinte d'amusie. Enfin, une récente étude de Provost (2011) a également précisé la prévalence de l'amusie congénitale dans une vaste population universitaire à 3,2%. Provost a également soulevé la possibilité de la présence d'une autre forme d'amusie, basée sur un mauvais traitement de l'information rythmique dans la musique. Bien que la prévalence de cette forme d'amusie du rythme soit estimée à 3.3% dans la population générale (Provost, 2011), à ce jour, seulement un cas a été rapporté et étudié dans la littérature (Phillips-Silver et al., 2011). C'est pourquoi l'essentiel des travaux effectués sur l'amusie congénitale se concentre actuellement sur la forme mélodique, découlant de difficultés de traitement des hauteurs dans la musique.

L'amusie congénitale semble donc être un trouble spécifique du traitement de la musique qui affecte un nombre significatif d'individus. En outre, l'émergence de ce trouble dès la naissance soulève la possibilité d'une origine organique, qui pourrait être retracée au sein de structures cérébrales spécifiques et associées à l'expression de difficultés comportementales précises. En ce sens, l'étude de l'étiologie de l'amusie congénitale et de l'expression de ses manifestations comportementales pourrait sans doute contribuer à approfondir notre compréhension des mécanismes cérébraux et fonctionnels associés au

traitement de la musique de manière plus générale. Par ailleurs, c'est également une démarche essentielle dans l'optique de pouvoir intervenir auprès de cette population selon une approche de réadaptation spécifique aux difficultés rencontrées et ciblant les structures neuronales impliquées. Il importe donc de se questionner sur la nature des difficultés rencontrées par les amusiques de même que l'étiologie du déficit sous-jacent, tel que nous le ferons dans les sections suivantes.

1.3.4. Étude comportementale

Parmi le nombre croissant de recherches portant sur l'amusie congénitale, une étude comportementale s'est d'abord intéressée à cette condition en tant que déficit réel et quantifiable (Ayotte, Peretz & Hyde, 2002). Les résultats des tests de perception du rythme, de détection de hauteurs tonales et de mémoire musicale ont permis de démontrer que les amusiques éprouvent de réelles difficultés propres à certains aspects du traitement de la musique, spécifiquement en ce qui a trait à la perception des hauteurs. La perception du rythme et la mémoire musicale sont, pour leur part, apparues relativement bien préservées. Plus précisément, dans une étude ultérieure, Hyde et Peretz (2004) ont défini la nature des difficultés de perception des hauteurs constatées chez les amusiques comme provenant d'un problème de discrimination tonale fine. Dans cette étude, les amusiques étaient appariés aux participants contrôles selon l'âge et le niveau d'éducation et chaque groupe devait déterminer si le quatrième son d'une séquence de cinq sons était identique ou différent des quatre autres sons homogènes et répétitifs présentés. Les différences de hauteur utilisées variaient de 25 cents à 300 cents (100 cents = 1 demi-ton). Dans une seconde tâche comportementale, les

participants devaient effectuer un exercice similaire, mais dont la différence consistait en un changement de l'intervalle temporel du quatrième son de la séquence. Les résultats ont permis de démontrer que les amusiques ne parvenaient pas à discriminer les différences tonales inférieures à un demi-ton contrairement aux contrôles qui réussissaient aisément, alors que la perception du rythme apparaissait pour sa part adéquate. Les mêmes difficultés de discrimination tonale fine ont également été constatées chez les enfants amusiques (Mignault Goulet, Moreau, Robitaille & Peretz, 2012), confirmant ainsi le rôle crucial d'une anomalie au niveau du traitement fin des hauteurs dans l'expression des problèmes rencontrés par les amusiques. La nature du déficit à l'origine de l'amusie congénitale ayant ainsi été clarifiée, une question critique se posait alors quant à l'étiologie organique de ce trouble, ce que nous allons maintenant aborder.

1.3.5. Étiologie et corrélats neuronaux

1.3.5.1. Le caractère héréditaire

À l'instar des aptitudes langagières, il est fort probable que les habiletés musicales se développent sous l'influence d'une composante génétique qui modèle les processus de croissance et de migration cellulaire, qui permettent à leur tour de parvenir à l'expression de capacités musicales spécifiques. En ce sens, on peut également imaginer qu'une altération de ces processus puisse mener à des anomalies anatomiques et s'exprimer par un dysfonctionnement des capacités cognitives nécessaires au traitement de la musique. En outre, on peut établir le parallèle entre l'amusie congénitale, qui est propre à la musique, et les troubles d'apprentissage spécifiques au langage, pour lesquels des études ont déjà démontré le

caractère héréditaire (pour une revue, voir Stromswold, 1998). Néanmoins, rien de comparable n'avait encore été effectué pour l'amusie congénitale, jusqu'à ce que Peretz et al. (2007) conduisent une importante étude de prévalence au sein de familles aux prises avec l'amusie congénitale et de familles dites contrôles, soit exemptes de cette problématique. Les résultats ont démontré une prévalence de l'amusie congénitale nettement supérieure chez les familles déjà aux prises avec l'amusie avec en moyenne 39% des individus atteints, versus une prévalence de 3% dans les familles contrôles. La présence d'amusie congénitale au sein d'une famille place donc les individus qui la constituent à haut risque d'être également atteints. Ces résultats indiquent que l'amusie congénitale revêt un important caractère héréditaire et soulèvent ainsi la possibilité de la présence d'un marqueur génétique. En suivant le raisonnement selon lequel un marqueur génétique peut contribuer, en concomitance avec les facteurs environnementaux, à générer des anomalies de développement ou de migration cellulaire, lesquelles sont à leur tour susceptibles d'engendrer des malformations anatomiques, il apparaît donc pertinent d'envisager que le déficit de discrimination tonale fine puisse être retracé et associé à des corrélats neuronaux propres à l'amusie congénitale.

1.3.5.2. Anomalies corticales et sous-corticales

Les résultats des études comportementales ont permis de bien cerner les difficultés de discrimination tonale fine rencontrées par les amusiques, ce qui permet à son tour de poser de bonnes hypothèses quant aux zones cérébrales pouvant être impliquées. Dans la recherche des corrélats neuronaux de l'amusie congénitale, le néocortex temporal s'avère être une région cérébrale de choix pour la détection d'une anomalie corticale associée à un déficit de

discrimination tonale fine. En effet, les résultats des études de lésions cérébrales de même que les recherches en neuro-imagerie convergent en démontrant l'implication des aires corticales auditives secondaires dans le traitement des changements de hauteur (Peretz & Zatorre, 2005). De plus, certaines études d'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle (Koelsch, Gunter, Cramon, Zysset, Lohmann & Friederici, 2002; Tillmann, Janata & Bharucha, 2003) ont aussi démontré le rôle central d'un réseau neuronal inférieur frontal droit, reliant les aires temporales et frontales du cortex, dans les processus associés au traitement sophistiqué des hauteurs.

En ce sens, les premières études s'étant intéressées aux corrélats anatomiques de l'amusie congénitale ont eu recours à l'imagerie par résonance magnétique. À l'aide de la technique de volumétrie par voxel du cortex (voxel based morphometry), Hyde et al. (2006) ont pu découvrir que la morphologie du cerveau des amusiques se distingue de celle des participants contrôles au niveau des aires corticales frontales. En effet, l'analyse volumétrique a permis de démontrer une réduction de la matière blanche au niveau du gyrus inférieur frontal droit chez les amusiques. Ce résultat est d'autant plus intéressant puisque l'anomalie anatomique observée chez les amusiques est fortement corrélée à leur performance dans des tâches musicales de discrimination tonale. De plus, le gyrus inférieur frontal a déjà été associé au processus de détection consciente d'incongruités tonales au sein de mélodies chez des participants normaux (Maess, Koelsch, Gunter & Friederici, 2001; Tillmann et al., 2003). Une étude subséquente de Hyde et al. (2007), ayant recours à des mesures d'épaisseur corticale, a également mis en lumière des différences morphologiques entre les amusiques et les

participants contrôles. De fait, les résultats ont démontré une épaisseur corticale supérieure au niveau du gyrus inférieur frontal droit de même que dans le cortex auditif droit des amusiques.

En se basant sur les anomalies morphologiques corticales et sous-corticales constatées chez les amusiques, des études subséquentes de connectivité cérébrale ont été conduites afin de clarifier le lien dynamique entre les diverses zones du néocortex atteintes dans l'amusie congénitale. Loui et al. (2009) ont d'ailleurs démontré une connectivité réduite au niveau du faisceau arqué chez les amusiques. Bien que le faisceau arqué gauche soit davantage connu pour son implication dans le traitement de l'information langagière, l'étude de Loui et al. a permis de démontrer la contribution de la branche supérieure du réseau de fibres axonales de l'hémisphère droit dans le processus de discrimination tonale, ce qui fait défaut chez les amusiques. Dans une étude récente, Hyde et al. (2011) ont également démontré une connectivité anormale dans l'hémisphère droit entre le cortex auditif et le gyrus inférieur frontal, soit les régions corticales ayant été ciblées par les études d'anomalies anatomiques chez les amusiques. Il apparaît donc clair que l'amusie congénitale peut être associée à des anomalies anatomiques de même qu'à des défaillances de connectivité cérébrale objectivables, qui contribuent à démontrer le caractère organique de ce trouble.

1.3.5.3. Profils de potentiels évoqués

Dans l'optique d'approfondir la compréhension des mécanismes neuronaux dynamiques sous-jacents au déficit de discrimination tonale fine constaté chez les amusiques, des études de potentiels évoqués ont été conduites. Les potentiels évoqués possèdent un

avantage certain pour l'étude de l'amusie puisqu'ils permettent d'évaluer les réponses électrophysiologiques de populations neuronales relativement circonscrites dans un délai temporel très court, soit à peine quelques millisecondes après la présentation d'un stimulus auditif. Leur grande précision temporelle permet ainsi de bien décortiquer la dynamique du décours temporel des réponses cérébrales. Peretz et al. (2005) furent les premiers à évaluer les réponses de potentiels évoqués chez les amusiques. Pour ce faire, le paradigme expérimental était construit à partir des tâches utilisées lors des études comportementales précédentes. En outre, les amusiques de même que les participants contrôles prenant part à cette étude ont été amenés à compléter une tâche de discrimination tonale identique à celle présentée lors de l'étude de Hyde et Peretz (2004) décrite plus tôt. Tout d'abord, les résultats comportementaux ont permis de confirmer la présence d'un déficit spécifique à la discrimination tonale fine chez les sujets amusiques, la perception des différences rythmiques étant, pour sa part, comparable aux contrôles. Mais cette étude est d'autant plus importante puisqu'elle a permis de mettre à jour des activations cérébrales anormales, tel que démontré par un complexe d'ondes N2b et P3b différent chez les amusiques comparativement aux participants contrôles en réponse à diverses différences de hauteur. De fait, il semble que le cerveau des amusiques ne réponde pas à des différences de hauteur inférieures à un demi-ton, tel que révélé par l'absence de la P3b, et qu'il réagit de manière amplifiée pour les changements supérieurs à un demi-ton, tel que révélé par la présence de la composante de potentiel évoqué N2b (normalement absente chez les participants contrôles) et d'une composante P3b de plus grande amplitude pour les grandes différences tonales.

La P3b est une composante de potentiel évoqué reconnue pour refléter le fonctionnement de la mémoire de travail (Donchin & Coles, 1988) de même que les processus conscients de détection de changements (Verleger, 1988) et dont l'amplitude est sensible aux probabilités d'occurrence des différences de hauteur utilisées (Webster, Adey & Colrain, 2002). Par conséquent, l'absence de la P3b pour les différences de hauteur inférieures à un demi-ton pourrait indiquer que le déficit de discrimination tonale fine observé chez les amusiques relève d'une anomalie de traitement associée au niveau des processus conscients et plus tardifs associés à l'attention. Pour leur part, l'augmentation d'amplitude de la P3b et l'apparition de la N2b observées chez les amusiques pour les grandes différences de hauteur pourraient représenter une autre anomalie neuronale associée à l'amusie, mais elles s'expliquent fort probablement mieux par un effet de saillance des stimuli. De fait, la majorité des petites différences de hauteur ne sont pas perçues par les amusiques. Par conséquent, on peut imaginer qu'elles sont traitées comme des sons standards par le cerveau. En se basant sur cette présomption, il apparaît alors possible que les amusiques soient exposés à un bien plus grand nombre de sons perçus comme des standards que les contrôles. Par conséquent, la saillance des grandes différences de hauteur s'en voit augmentée parce qu'elles ont une probabilité d'occurrence plus faible, ce qui résulte en une réponse cérébrale supérieure chez les amusiques. Dans cette perspective, il serait souhaitable d'ajuster la stimulation sonore présentée aux participants contrôles en fonction des pourcentages de sons détectés par les amusiques leur étant appariés, de manière à ce que chaque groupe soit exposé à un nombre comparable de déviants et ainsi contrôler pour un éventuel effet de saillance des déviations tonales présentées. Néanmoins, l'étude de Peretz et al. (2005) fut la première à démontrer que

le déficit de discrimination tonale fine retrouvé chez les amusiques est associé à des composantes de potentiel évoqué anormales.

L'autre résultat intéressant avancé par l'étude de Peretz et al. (2005) est que la composante de potentiel évoqué N1 serait normale chez les amusiques. Rappelons que la N1 est une composante de potentiel évoqué n'étant pas reconnue pour être représentative d'un mécanisme de comparaison tonale mais reflète davantage une activation neuronale obtenue en réponse aux caractéristiques physiques de tous les sons présentés au participant (Näätänen, 1992). Sachant que de nombreuses études ont permis de localiser les générateurs neuronaux de la N1 dans les aires auditives du cortex (ex., Scherg, Vajsar & Picton 1989), ce résultat pourrait donc suggérer que le cortex auditif des amusiques est intact. Toutefois, une récente étude d'Albouy et al. (2013), ayant effectué des enregistrements magnétoencéphalographiques de la N100m (l'équivalent magnétique de la N1), a démontré que le cerveau des amusiques ne perçoit pas normalement la hauteur des sons dans les mélodies et ce, dès les toutes premières notes d'une mélodie simple, avec une N1 plus tardive et de moins grande amplitude chez les amusiques. Cette étude soulève donc la possibilité que les amusiques démontrent des atteintes au niveau des mécanismes cérébraux précoces qui interviennent avant même l'initiation des processus de discrimination tonale, indiquant ainsi des anomalies de réponses cérébrales associées à l'activité du cortex auditif.

En ce sens, de récentes études se sont également penchées sur les réponses cérébrales du cortex auditif associées au processus de discrimination tonale chez les amusiques. Peretz et al. (2009) ont présenté 160 mélodies dont la moitié contenait une incongruité mélodique,

laquelle était générée en modifiant la hauteur d'un son cible à raison d'un quart de ton. Les amusiques et les contrôles devaient alors déterminer si chaque mélodie contenait ou pas une fausse note. Les résultats ont démontré que le cerveau des amusiques ne parvient pas à détecter les petites incongruités tonales d'un quart de ton à un niveau de traitement tardif et conscient, tel que révélé par l'absence de la composante de potentiel évoqué P600, qui est classiquement associée aux processus d'intégration et d'analyse consciente de cibles incongruentes au sein d'un contexte musical (Besson & Faïta, 1995). En contrepartie, le cerveau des amusiques parvient à discriminer ces mêmes petites différences tonales aussi bien que les contrôles à un niveau précoce, tel que révélé par la présence d'une composante N200 (aussi appelée la N2b) normale et des évidences de la présence d'une MMN également normale chez les amusiques. C'est donc dire que le cerveau des amusiques semble être en mesure de traiter les petites différences tonales à un niveau précoce et inconscient, mais que l'information ne semble pas parvenir aux niveaux de traitements plus tardifs associés à la prise de conscience qu'une différence tonale a été présentée. Toutefois, la N200 est une composante de potentiel évoqué qui survient lorsque le participant doit porter attention à la stimulation sonore présentée. Elle ne permet donc pas d'évaluer les processus de discrimination tonale tout à fait indépendants de l'attention. De plus, bien que les résultats de Peretz et al. (2009) semble suggérer la présence d'une MMN normale pour les petites différences tonales, le paradigme utilisé dans cette étude n'est pas optimal en vue d'observer la MMN de manière isolée, qui se voit ici fort probablement contaminée par la N2b qui survient parce que les participants portent attention aux sons visant à évoquer la MMN.

À cet effet, Braun et al. (2008) ont proposé un paradigme expérimental visant à étudier la MMN et la P300 (aussi appelée la P3b) chez les amusiques. Pour ce faire, les participants devaient écouter de manière passive des mélodies familières, dont certaines contenaient une incongruité tonale, pendant qu'on enregistrerait leurs réponses de potentiel évoqué. Les résultats obtenus se sont révélés paradoxaux et en contradiction avec la littérature existante en démontrant que les amusiques ne semblent pas détecter les différences tonales à un niveau précoce et inconscient, tel que révélé par l'absence de la MMN, mais parviennent à traiter efficacement la même information au niveau des processus tardifs et conscients, tel que révélé par la présence d'une P300 normale. Toutefois, des lacunes importantes au niveau du paradigme expérimental de cette étude ont pu interférer avec les résultats, notamment en ce qui a trait au choix d'un paradigme d'écoute passive pour évoquer la MMN. De fait, bien que la vigilance ne soit pas directement sollicitée, l'attention est néanmoins mobilisée et dirigée vers la stimulation auditive, ce qui pourrait interférer avec l'enregistrement de la MMN. En ce qui a trait à la P3, il est possible que les différences tonales utilisées n'aient pas été suffisamment petites pour discriminer les amusiques des contrôles dans leurs réponses. En outre, la question demeure à savoir si les amusiques parviennent ou pas à traiter l'information à un niveau précoce, inconscient et exempt de l'attention. En ce sens, l'étude de la composante de potentiel évoqué MMN dans un contexte bien contrôlé pourrait nous éclairer à cet effet. À ce jour, seuls des résultats préliminaires de Moreau, Jolicoeur et Peretz (2009) ont avancé que la MMN serait normale chez les amusiques en réponses à tous types de différences tonales, mais ces résultats doivent encore être validés.

Plus récemment, une étude de cas (Lebrun, Moreau, McNally-Gagnon, Mignault Goulet & Peretz, 2011) menée auprès d'une enfant amusique âgée de 10 ans a démontré une MMN anormale en réponse aux petites différences de hauteur présentées dans un contexte non-mélodique de discrimination tonale. Toutefois, les résultats d'une étude similaire, ayant été menée en parallèle aux travaux de la thèse actuelle auprès d'un grand groupe d'enfants amusiques par Mignault Goulet et al. (2012), a permis de démontrer une MMN normale, et ce, même en réponse à de petites différences tonales, de même que l'absence de la P3b pour les déviations inférieures à un demi-ton chez les enfants amusiques. Ces résultats suggèrent donc que le cerveau des enfants amusiques détecte et traite l'information associée aux petites différences tonales à un niveau inconscient et précoce, mais que cette même information ne semble pas parvenir aux mécanismes plus tardifs, permettant de prendre explicitement conscience de la présence d'une incongruité tonale. Un patron similaire de résultat est donc attendu auprès de la population des amusiques adultes.

2. Objectifs et hypothèses

L'objectif général de la présente thèse est d'abord, d'étudier les effets d'un paradigme expérimental incluant la présentation d'un film avec la trame sonore sur l'enregistrement de la MMN, puis d'évaluer les mécanismes précoces et inconscients de discrimination des hauteurs chez les adultes à l'aide de la MMN.

La première étude vise donc à évaluer les effets de la présentation de la trame sonore d'un film lors de l'enregistrement de la MMN et, plus spécifiquement, à déterminer la nature de l'interférence engendrée par la trame sonore. La première hypothèse est que la MMN sera affectée par la présentation de la trame sonore. Ainsi, nous nous attendons à ce que l'amplitude de la MMN soit réduite dans la condition où la trame sonore du film sera présentée en comparaison à la condition avec un film silencieux et sous-titré, mais à ce que la morphologie et la topographie de la MMN soient préservées, n'indiquant pas d'altération du mécanisme générateur de la MMN. La seconde hypothèse est que la réduction d'amplitude de la MMN sera attribuable à un effet d'interférence acoustique et non pas à un effet de l'attention. En ce sens, dans un premier temps, nous nous attendons à ce que l'amplitude de la MMN demeure réduite lorsque l'attention des participants sera redirigée vers la modalité visuelle, par la présentation de la trame sonore inversée et dénuée de sens, indiquant ainsi que la diminution d'amplitude observée ne relève pas d'un effet attentionnel. Dans un deuxième temps, nous nous attendons à ce que l'amplitude de la MMN diminue proportionnellement à l'augmentation de l'intensité sonore de la trame du film par rapport aux sons visant à évoquer la MMN, témoignant ainsi d'un effet d'interférence acoustique.

La seconde étude vise à évaluer les mécanismes précoces et inconscients de discrimination tonale chez les adultes amusiques par l'entremise de la MMN et à réévaluer la P3b chez la même population en contrôlant pour un possible effet de saillance des stimuli. La première hypothèse est que la MMN sera normale chez les amusiques et les contrôles, tant pour les petites que les grandes différences tonales, témoignant ainsi d'un processus de discrimination tonale normal à un niveau de traitement précoce et inconscient. Dans un second temps, afin de contrôler pour un effet de saillance des grandes différences tonales sur la P3b chez les amusiques, les probabilités d'occurrence des sons déviants présentés aux contrôles seront ajustées afin de correspondre au nombre de différences tonales perçues par les amusiques. La seconde hypothèse est que les amusiques ne présenteront pas de P3b pour les petites différences tonales comparativement aux contrôles, mais que les deux groupes obtiendront des P3b comparables pour les grandes différences tonales. Cela confirmera que les réponses de potentiel évoqué anormales constatées chez les amusiques sont circonscrites à la P3b et découlent d'un déficit de discrimination tonale fine associé à des processus tardifs et conscients du traitement de l'information.

3. Méthodologie et résultats

3.1. Article I

**SUCCESSFUL MEASUREMENT OF THE MISMATCH NEGATIVITY DESPITE A
CONCURRENT MOVIE SOUNDTRACK: REDUCED AMPLITUDE BUT NORMAL
COMPONENT MORPHOLOGY**

Patricia Moreau, Pierre Jolicœur, Pascale Lidji et Isabelle Peretz

Article sous presse dans : Clinical Neurophysiology

Running head: MMN WITH MOVIE SOUNDTRACK

Successful measurement of the mismatch negativity despite a concurrent movie soundtrack:

Reduced amplitude but normal component morphology

Patricia Moreau¹, Pierre Jolicœur¹, Pascale Lidji^{1,2}, and Isabelle Peretz¹

1. International Laboratory for Brain, Music, and Sound Research (BRAMS), Department
of Psychology, University of Montreal, Canada

2. Unité de Recherche en Neurosciences Cognitives, Université Libre de Bruxelles, Belgium

CORRESPONDENCE TO:

Patricia Moreau

BRAMS, Université de Montréal

Pavillon 1420 Boul. Mont-Royal

CP 6128, Succ. Centre-ville

Montreal, Qc, Canada

H3C 3J7

e-mail:

phone : 514-343-6111 #2799

fax : 514-343-5787

ABSTRACT

Objective: To examine the mechanisms responsible for the reduction of the mismatch negativity (MMN) ERP component observed in response to pitch changes when the soundtrack of a movie is presented while recording the MMN.

Methods: In three experiments we measured the MMN to tones that differed in pitch from a repeated standard tone presented with a silent subtitled movie, with the soundtrack played forward or backward, or with soundtracks set at different intensity levels.

Results: MMN amplitude was reduced when the soundtrack was presented either forward or backward compared to the silent subtitled movie. With the soundtrack, MMN amplitude increased proportionally to the increments in the sound-to-noise intensity ratio.

Conclusion: MMN was reduced in amplitude but had normal morphology with a concurrent soundtrack, most likely because of basic acoustical interference from the soundtrack with MMN-critical tones rather than from attentional effects.

Significance: A normal MMN can be recorded with a concurrent movie soundtrack, but signal amplitudes need to be set with caution to ensure a sufficiently high sound-to-noise ratio between MMN stimuli and the soundtrack.

KEYWORDS: Auditory ERP, mismatch negativity, movie soundtrack, attention, masking noise, pitch.

HIGHLIGHTS: 1) The mismatch negativity (MMN) is observed but with reduced amplitude when EEG is recorded while listening to a movie soundtrack.

2) The movie soundtrack acts as a low-level masking noise.

3) MMN amplitude increases as the sound-to-noise ratio of the MMN-critical tones over the soundtrack increases.

1. INTRODUCTION

When a physically deviant sound is presented within a sequence of repetitive acoustic stimuli, diverse event-related potential (ERP) components may be observed in response to the sound deviance. One of these components, the mismatch negativity (MMN), has proven to be a sensitive index of the perceptual detection of change for many acoustic stimulus features (Näätänen and Winkler, 1999; for a critical review, see May and Tiitinen, 2010). In the paradigm classically used to elicit an MMN, sounds are presented to the observer along with a diversion task generally consisting in reading a book or watching a silent subtitled movie (Muller-Gass et al., 2005).

Although the MMN is typically measured by presenting sounds in silence, in some MMN studies, the participants were allowed to listen to the soundtrack of a movie at a low intensity level (40 – 55 dB SPL) while they were presented with the auditory stimulation designed to produce the MMN (e.g., Bellis et al., 2000; Bradlow et al., 1999; Hayes et al., 2003; Kraus et al., 1999; McGee et al., 2001; Starratt and Nash, 2004; Todd et al., 2008; Tremblay et al., 1997). In a recent study, McArthur et al. (2003) assessed the efficacy of presenting a movie with the soundtrack to elicit an MMN component. They presented binaurally through headphones, a 600 Hz deviant tone and a 700 Hz standard sound (duration, 25 ms; ISI, 320 or 200 ms) at an intensity level of 80 dB SPL as the participants watched a movie with the soundtrack presented at 50 dB SPL in one condition, and with the movie soundtrack turned off in the other condition. They observed a reduction in MMN amplitude when the movie soundtrack was on. A similar MMN reduction was also observed in children by Mahajan and McArthur (2011).

These results clearly point to an observable effect of the movie soundtrack on the MMN. However, they do not explain why the MMN is reduced. Presenting the movie soundtrack could facilitate the testing of pre-literate children or the illiterates, or some clinical populations, by alleviating boredom by means of an entertaining distraction. But before using such a paradigm, there is a need to ensure that the movie soundtrack does not alter the generation mechanism of the MMN in such a way that it could confound the interpretation of the results. From a theoretical point of view, it is also worth studying the effect of the soundtrack on the MMN. Indeed, the reduction observed in MMN amplitude in the presence of the soundtrack may reflect an attentional effect. On the other hand, as suggested by Mahajan and McArthur (2011), it could also be that the soundtrack generated a masking noise effect, by which the complex array of voices, sounds, and music of the soundtrack may interfere with the sensory encoding of MMN-critical tones.

The attentional effect hypothesis has not been raised in previous studies evaluating the effect of a concurrent soundtrack on the MMN, and this hypothesis deserves consideration. Before exploring diverse hypotheses regarding the effect of the soundtrack on the MMN, it is first worth examining how the MMN generation mechanism works and how attention is expected to affect MMN. According to Näätänen's model (Näätänen, 1990), the elicitation of the MMN depends on the formation of a short-lived sensory memory trace of a frequent sound (often called the standard). The standard stimulus memory representation is strengthened as the sound is repeatedly presented. However, if a subsequent deviant stimulus is detected as different from the sensory trace of the standard sound, then the MMN generator mechanism is activated. More recently, the MMN has rather been described as representing a response to a

violation of an auditory regularity, such as a rare change in the physical features of a standard repetitive stimulus (Winkler, 2007). That is, the repeating standard sounds generate a regularity representation to which the auditory upcoming events are compared. If a stimulus breaks the regularity, then the MMN is elicited. Furthermore, in the classic oddball paradigm used to elicit an MMN, there is also some evidence of the contribution of the auditory N1 component (Kujala et al., 2007). In fact, as the standard sounds are repeatedly presented, the neurons gradually become increasingly more refractory, which generates a smaller N1 to the standard. Following this adaptation, the neurons dedicated to the frequency of the deviant sounds will show less refractoriness and will generate a larger N1. Thus, when subtracting the waveforms in order to extract the MMN, the contribution of the N1 will remain. However, in this article, we will refer solely to the MMN but the reader should bear in mind that it also likely contains N1 contributions.

Many studies have also focused on the neural generators of the MMN. Näätänen and Alho (1995) have suggested that the MMN-generating mechanism reflects the activation of neural populations in the temporal lobes, responsible for the detection of change, and in the frontal areas involved in the initiation of an attentional switch towards the (previously) unattended stimulus (see Deouell, 2007, for a critical review). When both temporal and frontal neural generators are activated, a resulting MMN can be observed as a fronto-central negative deflection generally peaking at Fz between 100 and 250 ms after the onset of the rare stimulus (Tiitinen et al., 1994). Central to Näätänen's model of the MMN generating system is the claim that the change detection process is automatic and does not require attention, which has

generated an ongoing debate on the effects of attention on the MMN (see Sussman, 2007, for a critical review).

In early studies aiming to demonstrate the insensitivity of the MMN to attention, researchers used selective-listening tasks with dichotic auditory stimulation that aimed to focus attention on the stimuli presented in one ear and divert attention from the sounds presented to the other ear. These paradigms have demonstrated that small changes in the auditory stimulation elicited comparable MMNs when the stimuli were either presented to the to-be-attended or to the to-be-unattended ear (Näätänen et al., 1978, 1980). However, these results have been criticized (Woldorff and Hillyard, 1990), and further studies have demonstrated that attention could affect the recording of the MMN (Alain and Woods, 1997; Näätänen et al., 1993; Oades and Dittmann-Balcar, 1995; Woldorff et al., 1991), by showing that MMN amplitude increased when the stimuli were being attended. Yet, these results were also criticized and described as reflecting the effect of an additional task-relevant ERP component named N2b (Näätänen, 1991). The N2b is a negative deflection that reflects a response to a target stimulus when the task requires detecting deviations, that may overlap with the MMN both temporally and spatially, resulting in a summation of ERP components that could be (mistakenly) interpreted as a larger MMN in the attended condition (Näätänen, 1991).

In order to avoid the problem created by the summation of the N2b with the MMN in the attended condition, further studies manipulated task demands to avoid attention from being actively directed to the MMN-critical tones, and they generally found no effect of concurrent

visual task difficulty on the MMN response (Alho et al., 1992; Dittmann-Balcar et al., 1999; Harmony et al., 2000; Kathmann et al., 1999; Muller-Gass et al., 2006; Otten et al., 2000). Only a few studies found an attentional load effect on the MMN with contradictory results (Kramer et al., 1995; Yucel et al., 2005; Zhang et al., 2006). More recently, Sussman (2007) shed new light on the debate on the effects of attention on the MMN by proposing that attention does not influence the MMN generating mechanism as a whole, but can specifically interfere with the formation process of the standard. Attentional effects were observed when focusing on specific aspect of the auditory stimulation, such as actively discriminating sound pitches (Sussman et al., 1998a) or focusing on sequential patterns within the stream of sounds (Sussman et al., 2002). These considerations highlight the potential importance of the acoustic context for the formation of the memory trace of the standard, *per se*, rather than solely on the deviance detection mechanism.

The issues addressed in the debate on the effect of attention on the MMN raise interesting questions regarding the paradigms used to generate the MMN in studies not aiming to evaluate attentional effects. Indeed, in the MMN experiments using a movie soundtrack, the diversion task presented to the participant requires attention in both visual and auditory modalities. However, watching a movie is not a highly demanding task, and when the soundtrack is presented, part of the participant's attention is likely oriented to the auditory modality and probably also to the MMN-critical tones occurring simultaneously. On the other hand, one could also wonder if the semantic content of the soundtrack interferes with the elicitation of the MMN by generating semantic processing of the information. Furthermore, as the soundtrack is presented simultaneously to the auditory stimulation meant to evoke the

MMN, the MMN-critical tones become part of a complex auditory scene that will act as masking noise, out of which it may be difficult to extract the standard and deviant sounds needed for the deviance detection generating mechanism of the MMN to occur, which may result in the reduction or the abolition of the MMN. These are all possibilities that need to be addressed before considering presenting a movie soundtrack in a study using the MMN.

Here, in a first experiment, we re-examined the effect of presenting a movie soundtrack on the MMN and in two following experiments, we aimed to answer the following questions: (1) whether the semantic content of the movie soundtrack could interfere with the elicitation of the MMN by reducing its amplitude, either through the effect of semantic processing or as a result of attention being focused simultaneously on the soundtrack and the MMN-critical tones; (2) or if the soundtrack, as a whole, acted as a masking noise interfering with the auditory perception at an early level.

2. EXPERIMENT 1

2.1. Method

2.1.1. Participants

The participants were twelve native French speaking students (10 women, 2 men) recruited from the Department of Psychology at the University of Montreal (mean age: 21.4, range: 19 to 26). They all had normal hearing threshold (i.e., below 25 dB HL) for a 1000 Hz pure tone and they showed no learning or language disorders, nor any neurological deficits. This study was vetted by the Ethics Committee of the Faculty of Arts and Science at University of Montreal, and written informed consent was obtained from each participant.

2.1.2. Material

The auditory stimuli were piano notes created with specialized software (Sibelius 5.0, exported as wave files using KontaktPlayer 2, from Native Instrument, running the Sibelius Sounds Essentials samples). The sounds had a duration of 100 ms (rise and fall of 10 ms) and were normalized in energy with Adobe Audition V3.0 at 44.1 KHz in 16-bit format. They were presented at a fixed inter-stimulus interval of 400 ms (SOA = 500 ms). The experimental stimulation consisted of a frequent standard tone played at a pitch level of C6 (1047 Hz). The rare deviant tones were higher or lower in pitch than the standard tone with pitch differences of 50 cents (1017 and 1077 Hz) or 300 cents (880 and 1245 Hz), 100 cents corresponding to one semitone. The sequence of tones contained 4500 standard tones (probability of occurrence = .9) and 125 tones of each of the four deviant frequencies (probability of occurrence = .025 each) for a total of 5000 sounds. The presentation of the sounds was pseudo-randomized so that every deviant tone was preceded by at least four standard tones.

2.1.3. Procedure

The participants were seated in a sound-attenuated and electrically-shielded room at a comfortable distance (approximately 1 meter) away from an 18 inch computer screen. Auditory stimuli were presented binaurally through headphones (TDH-39) at an intensity level of 70 dB SPL. We measured the sound intensity levels for each ear at the level of the headphones using a sonometer for each auditory stimulus. For the movie soundtrack, we calculated the mean intensity level of the whole soundtrack and created a sinusoidal sound with the same mean intensity level, which was then used to adjust the intensity level of the soundtrack in the various conditions. In one condition, the participants watched the movie

without subtitles and with the soundtrack presented binaurally through the headphones at an average intensity level of 63 dB SPL (“Soundtrack” condition), so there was a 7 dB difference between the soundtrack and the auditory stimuli. In the other condition, the movie was presented with subtitles and with the soundtrack turned off (“No Soundtrack” condition). Each condition lasted 42 minutes. Each participant was tested in both conditions, with the order of presentation counterbalanced across participants. In both conditions, the participants were instructed to ignore the tones and to concentrate on the movie (“Finding Nemo,” Disney and Pixar, 2003).

The electroencephalogram (EEG) was recorded (bandpass, 0.05–70 Hz; sampling rate, 256 Hz; impedance < 5 K Ω) via a Neuroscan amplifier (Neuroscan SynAmps², Compumedics, El Paso, TX) from 64 electrodes at the standard 10–10 scalp sites referenced online relative to the vertex. Bipolar electrode pairs monitored horizontal and vertical electrooculograms (EOG). Offline, the EEG data were corrected for eye movements (Semlitsch et al., 1986) and filtered (bandpass, 0.05–30 Hz, 24 dB/octave). Segments with a signal on an EEG channel outside of ± 100 μ V were marked as artefacts. The data were then divided into epochs of 600 ms including a 100 ms pre-stimulus interval for baseline correction and re-referenced to the averaged mastoids in order to maximize the MMN signal by including both mastoidal and frontal contributions. Separate averages were computed for the frequent, standard, tones and for the deviant tones that differed by 50 cents and 300 cents (i.e., averaging across pitch-change directions). MMN waveforms were obtained by subtracting the waveform for the standard tone from the waveform for the deviant of each pitch distance. The MMN amplitudes were quantified by computing the mean amplitude over a 40 ms window centered at each

individual's peak amplitude detected using the local peak amplitude method within a time window of 100 to 250 ms, and the latency as the time point of peak amplitude. The results are reported at the electrode Fz where the MMN amplitude was the largest and also at all 62 electrode sites in the scalp distributions. The original degrees of freedom are reported for all statistical analyses. Type 1 errors associated with inhomogeneity of variance were controlled by decreasing the degrees of freedom using the Greenhouse-Geisser epsilon.

2.2. Results

In preliminary analyses, MMN measurements of amplitude were subjected to an analysis of variance (ANOVA) that included administration order (Soundtrack first vs. second) as a between-subjects factor, and pitch distance (50 vs. 300 cents) and movie presentation mode (Soundtrack vs. No Soundtrack) as within-subjects variables. The analysis revealed no main effect of administration order, $F(1, 10) = 1.86$, *n.s.*, nor any significant interaction between administration order and pitch distance, $F(1, 10) = 0.66$, *n.s.*, or movie presentation mode, $F(1, 10) = 2.01$, *n.s.* Accordingly, the two groups of participants who received different orders of presentation were combined in the following analyses and the group factor was not considered further.

Figure 1a shows the ERPs time locked to tone onset in each condition. Three components were identified in the ERPs to the standard tones in both conditions of the movie presentation mode (Soundtrack vs. No Soundtrack): P1, N1, and P2. As depicted by Figure 1a, all ERP components were numerically smaller in the Soundtrack condition. In order to assess statistically the general effect of the soundtrack on these ERP components found on the

standard wave, we measured the mean amplitude over a 100 ms window ranging from 100 ms to 200 ms. A one-tailed paired-samples *t*-test comparing scores for the two conditions of the movie presentation mode (for each participant) was conducted on the measures of mean amplitude, which yielded a significant result with $t(11) = 2.56, p < .026$.

As can be seen in the low portion of Figure 1a, the deviant-minus-standard waves showed that an MMN was elicited by both pitch distances in the condition with the movie soundtrack as well as in the condition with no soundtrack. An ANOVA performed on the mean amplitude of the MMN with pitch distance and movie presentation mode as within-subjects factors yielded no significant interaction, $F(1, 11) = 2.20, p > .16$, but a main effect of movie presentation mode, reflecting the smaller MMN in the Soundtrack condition than in the No Soundtrack condition, $F(1, 11) = 5.16, p < .045$. There was also a main effect of pitch distance, reflecting a smaller MMN in the 50 cents condition than in the 300 cents condition, $F(1, 11) = 30.87, p < .0002$. Although MMN amplitude was smaller in the condition with the soundtrack, one sample *t*-tests conducted on the measure of MMN amplitude for both pitch differences in the Soundtrack condition revealed that MMN amplitude was significantly different relative to zero for the 50 cents condition, $t(11) = 2.25, p < .05$, as well as for the 300 cents condition with $t(11) = 4.77, p < .0006$.

[Insert Figure 1 around here]

Peak latencies of the MMN were also subjected to the same ANOVA model. The mean peak latency occurred later in the 50 cents condition ($M = 186$ ms) than in the 300 cents

condition ($M = 133$ ms), $F(1, 11) = 53.52$, $p < .0001$. There was no significant effect of movie presentation mode, $F(1, 11) = 1.99$, $p > .186$, nor a significant interaction between these two factors, $F < 1$.

In Figure 1b we show the MMN difference waves for the 50 cents and 300 cents conditions for the two conditions of the movie presentation mode at a number of electrode sites. A fronto-central maximum at Fz can clearly be observed. In order to be able to observe the MMN inversion at the mastoids, we re-referenced the data to a whole-head average, but all other topographical analyses were conducted on the measures referenced to the average mastoids. Figure 2a shows the MMN inversion observed between the signal at Fz and the mastoids (left mastoid shown). In order to compare the scalp distribution of the MMN observed in the Soundtrack condition to the distribution of the MMN in the No Soundtrack condition, the MMN measures of amplitude for the 300 cents pitch difference were normalized using the McCarthy and Wood procedure (1985) which, although controversial, remains useful for many purposes (for opposing views, see Haig et al., 1997; Ruchkin et al., 1999). According to this procedure, the amplitude differences observed between the experimental conditions are removed by scaling the amplitude measures to the maximum of each condition. Then, the data were subjected to an ANOVA using the Greenhouse-Geisser correction for nonsphericity with electrode (62 recorded electrodes) and movie presentation mode (Soundtrack vs. No Soundtrack) as within-subjects factors. As expected from Figure 1b, the results demonstrated no significant interaction of these two factors, $F < 1$, suggesting that there was no difference in the general shape of the MMN scalp distributions across the

Soundtrack and No Soundtrack conditions. The main effect of Electrode was significant, $F(61, 671) = 24.32, p < .0001$, as expected.

[Insert Figure 2 around here]

2.3. Discussion

This experiment demonstrated that the processing of pitch deviances is largely unaffected by presenting a movie soundtrack, other than generally to attenuate ERP responses to sounds presented concurrently with the soundtrack. In line with the prior findings of McArthur et al. (2003) and Mahajan and McArthur (2011), we observed a smaller MMN when the movie soundtrack was on than when it was off. Importantly, however, the amplitude and latency changes in the MMN, as a function of pitch differences, were not affected qualitatively by the presence of the soundtrack. Although the soundtrack reduced the overall amplitude of the MMN, mainly because it reduced ERP amplitudes to all stimuli (standard and deviants, as is evident in Figure 1a), it did not distort important relationships between pitch differences and the relative amplitude and latency of the resulting MMN waveforms and the MMN scalp distribution also remained unchanged across the soundtrack conditions. Moreover, we found no particular evidence of the presence of an N2b when the soundtrack was turned on, given that the MMN maximum amplitude remained at Fz and we found the expected inverted MMN wave at the mastoids.

3. EXPERIMENT 2

Experiment 1 showed that the amplitude of the MMN is reduced when sounds are presented concurrently with a movie soundtrack, compared with what is measured with the soundtrack turned off. However, it is not entirely clear how the movie soundtrack may be responsible for the observed reduction in amplitude. One possibility is that, as the movie soundtrack is intelligible, being composed of a rich semantic content, it may generate semantic processing that interferes with the encoding of the MMN-critical tones. We could also further argue that as the MMN-critical tones are not really part of the soundtrack and are rather repetitive and likely to be perceived as annoying, they may fall outside the scope of attention by being filtered out, most of the attentional resources being dedicated to the intelligible semantic content of the movie soundtrack. Another possibility is that the intensity level of the tones was not high enough to dominate the intensity level of the soundtrack, as suggested by Muller-Gass et al. (2001), who showed that the MMN amplitude decreased as the intensity level of a noise, presented at the same time as the auditory stimuli, increased. These possibilities are investigated in Experiments 2 and 3.

In this second experiment, we investigated if the reduction observed in MMN amplitude when presenting MMN-critical tones over a movie soundtrack could be accounted for by an interference effect of the semantic content of the movie soundtrack with the tones, either at the attentional level or as a result of semantic processing. To this aim, we presented here the backward version of the original soundtrack to the participants. We reasoned that by inverting the movie soundtrack, we would remove the semantic content, while keeping the same amount of acoustic stimulation. If the reduction of the MMN observed in Experiment 1

was due to an interference of the semantic content of the soundtrack with the elicitation of the MMN, then making the soundtrack unintelligible by playing it backward should reduce semantic processing and also possibly redirect attention away from the soundtrack to the visual modality (subtitles), which could increase the MMN relative to the MMN observed when the soundtrack was played normally. If the reduced ERPs in Experiment 1 were due mainly to reduced sound-to-noise ratio at a purely acoustic level, the results of Experiment 2 should replicate those of Experiment 1.

3.1. Method

3.1.1. Participants

The participants were ten new native French speaking students (8 women, 2 men) recruited from the Department of Psychology at the University of Montreal (mean age: 21.8, range: 20 to 29). They all had normal hearing threshold (i.e., below 25 dB HL) for a 1000 Hz pure tone and they showed no learning or language disorders, nor any neurological deficits.

3.1.2. Material and procedure

The experiment was the same in all ways as Experiment 1 except for the following differences. The intensity level was adjusted according to each individual's hearing level. The individual hearing levels were assessed using an audiometric test and determined based on the results for a 1000 Hz pure tone. In order to ensure that the adjusted intensity levels of Experiment 2 were not louder than the levels used in Experiment 1, we calculated the average hearing levels of the participants of Experiment 1 and subtracted this measure from the intensity levels used in Experiment 1. The tones were presented binaurally through

headphones in two conditions: one with the movie soundtrack turned off and the movie presented with subtitles (No Soundtrack condition) and another condition with the movie soundtrack presented backward also with subtitles (Backward Soundtrack condition). By playing the soundtrack backward we kept the spectral and dynamic characteristics of the stimulation used in Experiment 1 while removing meaningful verbal content.

3.2. Results

As in Experiment 1, we found no effects associated with order of presentation (all $ps > .32$), and so we collapsed the data over this factor in subsequent analyses.

Figure 3a shows the ERPs time locked to tone onset in each condition. As in Experiment 1, the three components P1, N1, and P2 were identified in the ERPs to the standard tones in both conditions of the movie presentation mode (Backward Soundtrack vs. No Soundtrack) and were analyzed according to the same parameters. A one-tailed paired-samples t -test yielded a significant difference for the mean amplitude over a 100 ms window (100–200 ms), $t(9) = 1.97$, $p < .05$, indicating a smaller amplitude in the Backward Soundtrack condition.

Figure 3a shows the ERPs time locked to the onset of the tone in each condition. An MMN can be observed for each pitch distance in the No Soundtrack condition as well as in the condition with the backward movie soundtrack, although it was very small for the 50 cents condition with the backward soundtrack.

[Insert Figure 3 around here]

We performed *t*-tests against 0 for the amplitude of the MMN in both movie presentation mode conditions for both pitch distances. These tests confirmed that the MMN, although sometimes small, was statistically reliable in all conditions, all *ps* < .004.

The amplitude of the MMN was calculated and subjected to the same ANOVA as in Experiment 1. As can be seen in Figure 3, the MMN was larger in the No Soundtrack condition than in the Backward Soundtrack condition. A significant interaction was found between movie presentation mode and Pitch distance, $F(1, 9) = 5.42, p < .05$, which reflected the larger difference between the 50 cents ($M = -2.65$) and the 300 cents ($M = -4.31; p < .001$) pitch deviance conditions in the No Soundtrack condition than in the Backward Soundtrack condition, 50 cents ($M = -.76$), the 300 cents ($M = -1.96; p < .001$).

The latencies of the amplitude peaks for the MMN waveforms were submitted to an ANOVA, as in Experiment 1. The mean peak latency occurred later in the 50 cents condition ($M = 184$ ms) than in the 300 cents condition ($M = 117$ ms), $F(1, 9) = 70.00, p < .0001$. As in Experiment 1, there were no effects of movie presentation mode, $F < 1$, and no interaction of movie presentation mode and pitch, $F < 1$.

We compared the MMN scalp distributions for the 300 cents condition across the Backward Soundtrack and the No Soundtrack conditions, as in Experiment 1. Again, there was no hint that these distributions differed, $F < 1$, providing no indication that the soundtrack

altered the component structure of the MMN. As expected, we found a significant effect of Electrodes, $F(61, 549) = 29.67, p < .0001$.

In order to compare the MMN amplitude and latency results obtained by presenting the backward movie soundtrack (Backward Soundtrack condition) to the results found in Experiment 1 when presenting the integral (forward) movie soundtrack (Soundtrack condition), the results of the No Soundtrack conditions of Experiment 1 and 2 as well as the results of the forward and backward soundtrack conditions were subjected to a mixed ANOVA where the pitch distance and movie presentation mode (Soundtrack conditions vs No soundtrack conditions) were the within-subjects factor and the between-subjects factor was Group for which the levels were the participants of Experiment 1 and Experiment 2. Although MMN amplitude was numerically smaller in the Backward Soundtrack condition compared to the Soundtrack condition of Experiment 1, the analysis revealed no interaction associated to Experiments 1 and 2 for amplitude and latency (all $ps > .1$). As expected from the results described for the measures of amplitude in Experiment 2, a significant interaction of pitch distance by movie presentation mode was observed for the measures of amplitude with $F(1,20) = 5.21, p < .05$.

3.3. Discussion

As in Experiment 1, there was a significant reduction in the amplitude of the MMN when the MMN-related tones were played concurrently with a soundtrack played backwards. The attenuation of the MMN, if anything, appeared larger than in Experiment 1 but it certainly was not significantly less. The results also indicated that the MMN for the small pitch

difference is more affected by the presentation of the movie soundtrack by showing a greater reduction in MMN amplitude compared to the 300 cents pitch difference. However, one could argue that, as the MMN for the small pitch differences is already smaller and noisier than the one observed for the bigger pitch differences, it could be that it is simply more difficult to record it when presenting the movie soundtrack as a result of its decreased size and the increase in noise levels. In fact, although it is decreased in amplitude and maybe harder to measure, the MMN for the 50 cents pitch difference is still significantly there with statistical results providing no indication that MMN scalp distribution differed across the Backward Soundtrack condition and the No Soundtrack condition. Thus, researchers should keep in mind in future research that MMN can be recorded while presenting a movie soundtrack, but that they must be careful with small pitch differences, as these appear to be more affected by the movie soundtrack. Nevertheless, this experiment demonstrates that it is very unlikely that a semantic interference effect, relying either on attentional factors or semantic processing, may account for the general reduction observed in MMN amplitude when presenting the movie soundtrack simultaneously with the auditory stimuli generating the MMN.

4. EXPERIMENT 3

Here we investigated if the reduction observed in MMN amplitude when tones are presented concurrently with a soundtrack could reflect a reduction in the sound-to-noise ratio of the MMN-critical tones relative to the soundtrack (here the soundtrack is considered as noise). In some studies, the effects of presenting diverse types of noise while recording the MMN converged in showing MMN sensitivity to background noise (e.g., Kozou et al., 2005; Levänen and Mikko, 1997; Martin et al., 1999; Martin and Stapells, 2005). Based on the

Muller-Gass et al. (2001) study, which demonstrated that the MMN amplitude decreased as the intensity level of a noise presented simultaneously with the MMN-critical auditory stimulation increased, we expected the MMN amplitude to be larger when we increase the ratio between the intensity level of the MMN-critical sounds and the intensity level of the movie soundtrack. To this aim, we tested here sound-to-noise ratios of +7 dB SPL, as used in Experiments 1 and 2, and compared it to a larger ratio of +15 dB SPL.

4.1 Method

4.1.1. Participants

We recruited seventeen new native French speaking participants (11 women, 6 men) who were students at the University of Montreal (mean age: 21.8, range: 18 to 28). They all had normal hearing threshold (i.e., below 25 dB HL) for a 1000 Hz pure tone and they showed no learning or language disorders, nor any neurological deficits.

4.1.2. Material and procedure

The tones used to elicit the MMN were the same as in Experiments 1 and 2, and the testing took place in the same room with the same environmental conditions. As in Experiment 2, all auditory materials were adjusted to each individual's hearing level based on the results of an audiometric test. In order to examine the effect of sound-to-noise ratio, we manipulated the intensity levels of the tones and of the movie soundtrack to produce two sound-to-noise ratio conditions. All auditory stimulation was presented binaurally through headphones in two conditions: one condition which replicated the intensity levels used in Experiment 1, where the sounds used to elicit the MMN were presented at an intensity level of

62.5 dB SL (above each individual's hearing level) while the movie soundtrack was presented at an intensity level of 55.5 dB SL above each individual's hearing level (+ 7 dB difference condition), and another condition in which the MMN-critical sounds were presented at a higher intensity level of 67.5 dB SL (above each individual's hearing level) and the movie soundtrack presented at a lower average intensity level of 52.5 dB SL (above each individual's hearing level; +15 dB difference condition). It was necessary to change both the intensity of the soundtrack and the tones because we wanted to investigate a moderately large difference in signal-to-noise ratio across two conditions. If we had solely lowered the intensity level of the soundtrack, it would have been too low to be clearly audible. One may argue that evoked potentials are loudness-dependent, but the frequency-dependent MMN has been demonstrated to remain unchanged with changes in intensity levels (Schröger, 1996). Thus, any effects that we may observe on the MMN are most likely to reflect changes in signal-to-noise ratio rather than to variations in absolute intensity of the stimuli. The order of the two conditions was counterbalanced across participants. In both conditions, the participants were asked to ignore the tones and to focus their attention on the movie, which was the same as in Experiments 1 and 2. All EEG recording and offline analysis parameters were the same as in Experiments 1 and 2.

4.2. Results

Figure 4 shows the ERP waveforms for the standard, 50 cents, and 300 cents pitch conditions for each sound-to-noise ratio (+7 dB, +15 dB) condition, and the MMN difference waveforms (300 cents minus standard, 50 cents minus standard). As in Experiments 1 and 2, the three components P1, N1, and P2 were identified in the ERPs to the standard tones in both

sound-to-noise ratio conditions (+7 dB vs. +15 dB) and we measured the mean amplitude over a 100 ms window ranging from 100 ms to 200 ms. The one-tailed paired-samples *t*-test, comparing scores for the two soundtrack conditions (for each participant), yielded a significant result for the measure of mean amplitude with $t(16) = 3.80, p < .002$.

[Insert Figure 4 about here]

The mean amplitude of the MMN components was evaluated as in the previous experiments and subjected to a repeated-measures ANOVA with sound-to-noise ratio conditions and pitch differences as within-subjects factors, following an initial ANOVA that revealed no effects of testing order.

As can be seen in Figure 4, an MMN was elicited by both pitch differences in both sound-to-noise ratio conditions. The ANOVA run on the measure of amplitude revealed a significantly larger MMN amplitude in the 300 cents condition than in the 50 cents condition, $F(1, 16) = 70.00, p < .0001$, and a significantly larger average MMN in the +15 dB condition relative to the +7 dB condition, $F(1, 16) = 5.55, p < .04$. As suggested by Figure 4, the interaction was not significant, $F < 1$.

We also estimated the peak latency of individual participant's MMN waveforms in each condition and submitted them to an ANOVA with sound-to-noise ratio conditions and pitch differences as within-subjects factors. Only the difference in pitch (50 cents vs. 300 cents) between deviants and standards produced a significant latency difference, $F(1, 16) =$

32.11, $p < .0001$. Neither the sound-to-noise ratio conditions nor the interaction of sound-to-noise ratio conditions and pitch were significant, $F < 1$ in both cases.

In order to compare the scalp distribution of the MMN observed in the +7 dB condition to the distribution of the MMN in the +15 dB condition, the MMN measures of amplitude for the 300 cents pitch difference were normalized and subjected to an ANOVA similar to the ones performed in Experiments 1 and 2. Again, there was no evidence for a difference in scalp distributions, $F < 1$, corroborating what can be seen in Figure 4b. As expected, we found a main effect for the electrode factor, $F(61, 976) = 34.82, p < .0001$.

To determine if the MMN amplitude observed here with a larger ratio (+15 dB) matched the MMN amplitude observed when presenting the movie in silence with the subtitles, an ANOVA was performed on the MMN amplitudes obtained here for the +15 dB intensity level ratio condition and the subtitled conditions of Experiments 1 and 2 with the pitch differences as a within-subjects factor. As expected from a visual inspection of Figures 1, 3, and 4, the ANOVA confirmed that the MMNs observed in silence were larger than the one observed in noise with a +15 dB sound-to-noise ratio, $F(2, 36) = 9.97, p < .0004$. Scheffe posthoc tests revealed no significant difference between the two subtitled movie conditions (Experiments 1 vs. 2) ($p > .36$) but a significant difference was found between the two silent conditions and the + 15 dB ratio (Experiments 1 vs. 3, or 2 vs. 3; both $p < .05$). Importantly, however, there were no interactions between Group (participants of Experiments 1, 2 and 3) and the effects of pitch difference, $F < 1$. As expected, the MMN for the 50 cents pitch

difference was significantly smaller than for the 300 cents difference, $F(1, 36) = 89.95$, $p < .0001$.

4.3. Discussion

The most important finding in this experiment was that the MMN amplitude increased by reducing the intensity level of the movie soundtrack relative to the MMN-critical tones or by increasing the intensity level of the experimental tones. Accordingly, the reduction observed in MMN amplitude when presenting the soundtrack of a movie simultaneously to the auditory stimulation is probably best explained by supposing that the soundtrack acts as a masking noise that interferes with the encoding of the tones at the auditory perceptual level, which will be further discussed in the general discussion.

5. GENERAL DISCUSSION

The present study shows that presenting a movie soundtrack interferes with the recording of auditory ERPs mainly by reducing the sound-to-noise ratio of the experimental stimuli relative to background noise. In the context of studies focusing on the MMN and using a typical deviant versus standard paradigm, the reduced-amplitude ERPs to the standard and deviant result in a reduced-amplitude MMN. Based on the results of our experiments, it is very unlikely that the semantic content of the movie soundtrack interfered with the MMN, either at the attentional level or because of semantic processing, by causing a reduction in MMN amplitude when presenting the soundtrack. The MMN amplitude reduction is more likely explained by an acoustical effect by which the soundtrack acted as a masking noise, interfering with the encoding of the MMN-critical tones.

Importantly, our experiments confirm and extend previous work showing that the MMN, elicited by a difference in the pitch of deviant tones in the context of a repeated (standard) tone, can be measured in the presence of a concurrent soundtrack. Most importantly, although the amplitude of the MMN was reduced when measured with a concurrent soundtrack, neither the scalp distribution nor the latency of the MMN were altered. The MMN scalp distribution observed with the soundtracks had the usual fronto-central scalp distribution of the typical MMN observed in silence (e.g., Näätänen, 1992). Also, when using an average reference over 62 scalp electrodes on a 10–10 layout, which allowed for the verification of the polarity inversion at electrode sites below the Sylvian fissure and thus, the distinction of the MMN from the N2b, we observed a clear inversion of the MMN at the mastoids.

Additionally, systematic differences in the MMN latency associated with differences in the pitch distance between deviant and standard tones were reproduced faithfully in the MMN waveforms measured when presenting a concurrent soundtrack. However, these same differences were not preserved systematically for MMN amplitude. In fact, the MMN obtained for the small pitch differences showed a greater reduction in amplitude compared to the bigger pitch difference when presenting the backward soundtrack, suggesting that the MMN for small pitch differences is more affected by presenting the movie soundtrack. On the other hand, one could also argue that, as the MMN for the small pitch differences is already smaller and thus noisier, it may simply be more difficult to measure it. In fact, although MMN amplitude for the small pitch differences appears to be more decreased by the movie soundtrack, it is still significantly measurable, with unchanged scalp topographies. We are thus confident that an

MMN can be recorded when presenting a movie soundtrack, but researchers should be cautious when using small pitch differences, as they appear to be more affected by the movie soundtrack.

Interestingly, presenting the movie soundtrack also affected the ERP components observed on the standard wave, namely P1, N1, and P2. In fact, the standard waveform was statistically smaller when presenting the soundtrack, whether it was forward, backward, or at various sound-to-noise ratios. Here again, the soundtrack most likely acted as a masking noise that reduced the brain response to the sounds, resulting in smaller ERP amplitudes. Consequently, the difference waves were also smaller, thus resulting in an MMN of smaller amplitude. Such an effect was systematically observed when presenting the soundtrack throughout the various conditions.

In Experiments 2 and 3, we studied the underlying mechanisms accounting for the reduction observed in MMN amplitude. In the condition where the soundtrack was played backwards, the semantic content was removed and no semantic processing was expected. Furthermore, as the movie soundtrack became unintelligible, attention could be expected to be oriented more to the visual modality than to the auditory modality. Thus, no attentional effect on the MMN should be observed, such as indicated by an MMN amplitude comparable to the No Soundtrack condition. But here, we still observed a reduction in MMN amplitude when presenting the backward soundtrack, indicating that a semantic interference effect and also alternatively attention are very unlikely to have played a major role in the effects observed when presenting a movie soundtrack. In contrast, acoustical interference as measured by the

sound-to-noise ratio can account for all of our results in a straightforward way. This view was corroborated by the manipulation of sound-to-noise ratio between the soundtrack and the MMN-critical tones in Experiment 3, where the results clearly demonstrated that MMN amplitude increased when the sound-to-noise ratio was higher.

In summary, this study sheds new light by clarifying the mechanisms by which a soundtrack reduces the amplitude of concurrently-measured MMN components. The evidence suggests the principal mechanism of action is that the soundtrack acts as a masking noise that interferes with the perception of the MMN-critical tones. Our work has clear clinical implications for researchers wishing to measure the MMN ERP component with restless participants or in participants who are unable to read subtitles. In that case, viewing an entertaining movie with the soundtrack turned on is a viable solution. Our work shows that presenting the MMN-critical sounds at a level between +7 and +15 dB SPL above the soundtrack level will produce adequate results, particularly if the difference between the deviant sounds and the standard is sufficiently large (e.g., 300 cents for a difference in frequency). In such conditions, it is possible to measure the MMN ERP component produced by pitch differences between a repeated standard tone and several less frequent tones without altering the fundamental component structure of the MMN. The MMN for very small pitch differences, although still measurable despite noise, may be sufficiently or even more attenuated than larger pitch differences by the movie soundtrack to make systematic study more difficult. Researchers who wish to test the MMN with a concurrent soundtrack should verify that their specific experimental parameters are adequate for their target population prior to full-scale testing.

ACKNOWLEDGEMENT

This work was supported by Grants from the Canadian Institutes of Health Research (CIHR) and from a Canada Research Chair to I.P., by fellowships from the CIHR to P.M., from a Grant from the Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada (NSERC), and a Canada Research Chair to P.J., as well as by infrastructure funds from the Government of Quebec.

REFERENCES

- Alain C, Woods, DL. Attention modulates auditory pattern memory as indexed by event-related brain potentials. *Psychophysiology* 1997; 34: 534-546.
- Alho K, Woods DL, Algazi A, Näätänen R. Intermodal selective attention. II. Effects of attentional load on processing of auditory and visual stimuli in central space. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol* 1992; 82: 356-368.
- Bellis TJ, Nicol T, Kraus N. Ageing affects hemispheric asymmetry in the neural representation of speech sounds. *J Neurosci* 2000; 20: 791-797.
- Bradlow AR, Kraus N, Nicol TG, Cunningham J, Zecker SG, Carrell TD. Effects of lengthened formant transition duration on discrimination and neural representation of synthetic CV syllables by normal and learning-disabled children. *J Acoust So Am* 1999; 106: 2086-2096.
- Deouell LY. The frontal generator of the mismatch negativity revisited. *J Psychophysiol* 2007; 21: 188-203.
- Dittmann-Balcar A, Thienel R, Schall U. Attention-dependent allocation of auditory processing resources as measured by mismatch negativity. *Neuroreport* 1999; 10: 3749-3753.
- Haig AR, Gordon E, Hook S. To scale or not to scale: McCarthy and Wood revisited. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol* 1997; 103 : 323–325.
- Harmony T, Bernal J, Fernández T, Silva-Pereyra J, Fernández-Bouzas A, Marosi E, et al. Primary task demands modulate P3a amplitude. *Cogn Brain Res* 2000; 9: 53-60.

- Hayes EA, Warrier CM, Nicol TG, Zecker SG, Kraus N. Neural plasticity following auditory training in children with learning problems. *Clin Neurophysiol* 2003; 114: 673-684.
- Kathmann N, Frodl-Bauch R, Hegerl U. Stability of the mismatch negativity under different stimulus and attention conditions. *Clin Neurophysiol* 1999; 110: 317-323.
- Kozou H, Kujala T, Shtyrov Y, Toppila E, Starck J, Alku P, et al. The effect of different noise types on the speech and non-speech elicited mismatch negativity. *Hearing Res* 2005; 199: 31-39.
- Kramer AF, Treho LJ, Humphrey D. Assessment of mental workload with task-irrelevant auditory probes. *Biol Psychol* 1995; 40: 83-100.
- Kraus N, Koch DB, McGee TJ, Nicol TG, Cunningham J. Speech-sound discrimination in school-age children: Psychophysical and neurophysiologic measures. *J Speech Lang Hear Res* 1999; 42: 1042-1060.
- Kujala T, Tervaniemi M, Schröger E. The mismatch negativity in cognitive and clinical neuroscience: Theoretical and methodological considerations. *Biol Psychol* 2007; 74: 1-19.
- Levänen S, Mikko S. Disrupting human auditory change detection: Chopin is superior to white noise. *Psychophysiology* 1997; 34: 258-265.
- Mahajan Y, McArthur G. The effect of a movie soundtrack on auditory event-related potentials in children, adolescents, and adults. *Clin Neurophysiol* 2011; 122: 934-941.
- Martin BA, Kurtzberg D, Stapells DR. Masking on N1 and the mismatch negativity to speech sounds /ba/ and /da/. *J Speech Lang Hear Res* 1999; 42: 271-286.

- Martin BA, Stapells DR. Effects of low-pass noise masking on auditory event-related potentials to speech. *Ear Hear* 2005; 26: 195-213.
- May, PJC, Tiitinen, H. Mismatch negativity (MMN), the deviance-elicited auditory deflection, explained. *Psychophysiology* 2010; 47: 66-112.
- McArthur GM, Bishop DVM, Proudfoot M. Do video sounds interfere with auditory event-related potentials? *Behav Res Methods Instrum Comput* 2003; 35: 329-333.
- McCarthy G, Wood CC. Scalp distributions of event-related potentials: an ambiguity associated with analysis of variance models. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol* 1985; 62: 203-208.
- McGee TJ, King C, Tremblay K, Nicol TG, Cunningham J, Kraus N. Long-term habituation of speech-elicited mismatch negativity. *Psychophysiology* 2001; 38: 653-658.
- Muller-Gass A, Marcoux A, Logan J, Campbell KB. The intensity of masking noise affects the mismatch negativity to speech sounds in human participants. *Neurosci Lett* 2001; 299: 197-200.
- Muller-Gass A, Stelmack RM, Campbell KB. "...and were instructed to read a self-selected book while ignoring the auditory stimuli": The effects of task demands on the mismatch negativity. *Clin Neurophysiol* 2005; 116: 2142-2152.
- Muller-Gass A, Stelmack RM, Campbell KB. The effect of visual task difficulty and attentional direction on the detection of acoustic change as indexed by the Mismatch Negativity. *Brain Res* 2006; 1078: 112-130.
- Näätänen R. The role of attention in auditory information processing as revealed by event-related potentials and other brain measures of cognitive function. *Behav Brain Sci* 1990; 13: 201-288.

- Näätänen R. Mismatch negativity (MMN) outside strong attentional focus: a commentary on to Woldorff et al. (1991). *Psychophysiology* 1991; 28: 478-484.
- Näätänen R. *Attention and brain function*. Hillsdale, NJ: Erlbaum; 1992.
- Näätänen R, Alho K. Generators of electrical and magnetic mismatch responses in humans. *Brain Topogr* 1995; 7: 315-320.
- Näätänen R, Gaillard AWK, Mäntysalo S. Early selective-attention effect on evoked potential reinterpreted. *Acta Psychologica* 1978; 42: 313-329.
- Näätänen R, Gaillard AWK, Mäntysalo S. Brain potential correlates of voluntary and involuntary attention. In: Kornhuber HH, Deecke L, editors. *motivation, motor and sensory processes of the brain: electrical potentials, behaviour and clinical use, progress in research*, vol. 54. Amsterdam: Elsevier, 1980. pp. 343-348.
- Näätänen R, Paavilainen P, Tiitinen H, Jiang D, Alho K. Attention and mismatch negativity. *Psychophysiology* 1993; 30: 436-450.
- Näätänen R, Winkler I. The concept of auditory stimulus representation in cognitive neuroscience. *Psychol Bull* 1999; 125: 826-859.
- Oades RD, Dittmann-Balcar A. Mismatch negativity (MMN) is altered by directing attention. *NeuroReport* 1995; 6: 1187-1190.
- Otten LJ, Alain C, Picton TW. Effects of visual attentional load on auditory processing. *NeuroReport* 2000; 11: 875-880.
- Provost, M. (2011). *The prevalence of congenital amusia (dissertation)*. University of Montreal, Canada

- Ruchkin DS, Johnson R JR, Friedman D. Scaling is necessary when making comparisons between shapes of event-related potential topographies: A reply to Haig et al. *Psychophysiology* 1999; 36: 832-834.
- Semlitsch HV, Anderer P, Schuster P, Presslich O. A solution for reliable and valid reduction of ocular artifacts applied to the P300 ERP. *Psychophysiology* 1986; 23: 695-703.
- Starratt G K, Nash A J. An alternative baseline measure for calculation of the mismatch negativity (MMN) component of the event-related potential (ERP). *Int J Psychophysiol* 2004; 51: 201-208.
- Sussman ES. A new view on the MMN and attention debate: The role of context in processing auditory events. *J Psychophysiol* 2007; 21: 164-175.
- Sussman ES, Ritter W, Vaughan HG Jr. Attention affects the organization of auditory input associated with the mismatch negativity system. *Brain Res* 1998a; 789: 130-138.
- Sussman ES, Winkler I, Huotilainen M, Ritter W, Näätänen R. Top-down effects on the initially stimulus-driven auditory organization. *Cognitive Brain Res* 2002; 13: 393-405.
- Tiitinen H, May P, Reinikainen K, Näätänen R. Attentive novelty detection in humans is governed by pre-attentive sensory memory. *Nature* 1994; 372: 90-92.
- Todd J, Michie PT, Schall U, Karayanidis F, Yabe H, Näätänen R. Deviant Matters: Duration, Frequency, and Intensity Deviants Reveal Different Patterns of Mismatch Negativity Reduction in Early and Late Schizophrenia. *Biol Psychiat* 2008; 63: 58-64.

- Tremblay K, Kraus N, Carrell TD, McGee T. Central auditory system plasticity: Generalization to novel stimuli following listening training. *J Acoust Soc Am* 1997; 102: 3762-3773.
- Winkler I. Interpreting the mismatch negativity (MMN). *J Psychophysiol* 2007; 21: 147-163.
- Woldorff MG, Hackley SA, Hillyard SA. The effects of channel-selective attention on the mismatch negativity wave elicited by deviant tones. *Psychophysiology* 1991; 28: 30-42.
- Woldorff MG, Hillyard SA. Attentional influence on the mismatch negativity. *Behav Brain Sci* 1990; 13: 261-262.
- Yucel G, Petty C, McCarthy G, Belger A. Graded visual attention modulates brain responses evoked by task-irrelevant auditory pitch changes. *J Cogn Neurosci* 2005; 17: 1819-1828.
- Zhang P, Xiangchuan C, Yuan P, Zhang D, Sheng H. The effect of visuospatial attentional load on the processing of irrelevant acoustic distractors. *NeuroImage* 2006; 33: 715-724.

FIGURE CAPTIONS

Figure 1. Experiment 1: (a) Average responses to the standard tone and to the 50 cents and 300 cents pitch differences (top) and MMN difference waves (bottom) for the 50 cents and 300 cents pitch differences obtained at the electrode Fz in each soundtrack condition: With Movie Soundtrack (left) and No Soundtrack (right). (b) MMN obtained for the 50 cents and 300 cents pitch differences at other scalp locations in each soundtrack condition: With Movie Soundtrack (left) and No Soundtrack (right).

Figure 2. MMN difference waves in Experiment 1 (a), Experiment 2 (b) and Experiment 3 (c), for the 300 cents pitch difference obtained at the electrode Fz and at the left mastoid after re-referencing the data to a whole head average reference including all electrodes except EOG channels.

Figure 3. Experiment 2: (a) Average responses to the standard tone and to the 50 cents and 300 cents pitch differences (top) and MMN difference waves (bottom) for the 50 cents and 300 cents pitch differences obtained at the electrode Fz in each soundtrack condition: With Backward Soundtrack (left) and No Soundtrack (right). (b) MMN obtained for the 50 cents and 300 cents pitch differences at other scalp locations in each soundtrack condition: With Backward Soundtrack (left) and No Soundtrack (right).

Figure 4. Experiment 3: (a) Average responses to the standard tone and to the 50 cents and 300 cents pitch differences (top) and MMN difference waves (bottom) for the 50 cents and

300 cents pitch differences obtained at the electrode Fz in each of the intensity level conditions: + 7 dB difference (left) and + 15 dB difference (right). (b) MMN obtained for the 50 cents and 300 cents pitch differences at other scalp locations in each of the intensity level conditions: + 7 dB difference (left) and + 15 dB difference (right).

FIGURES

Figure 1

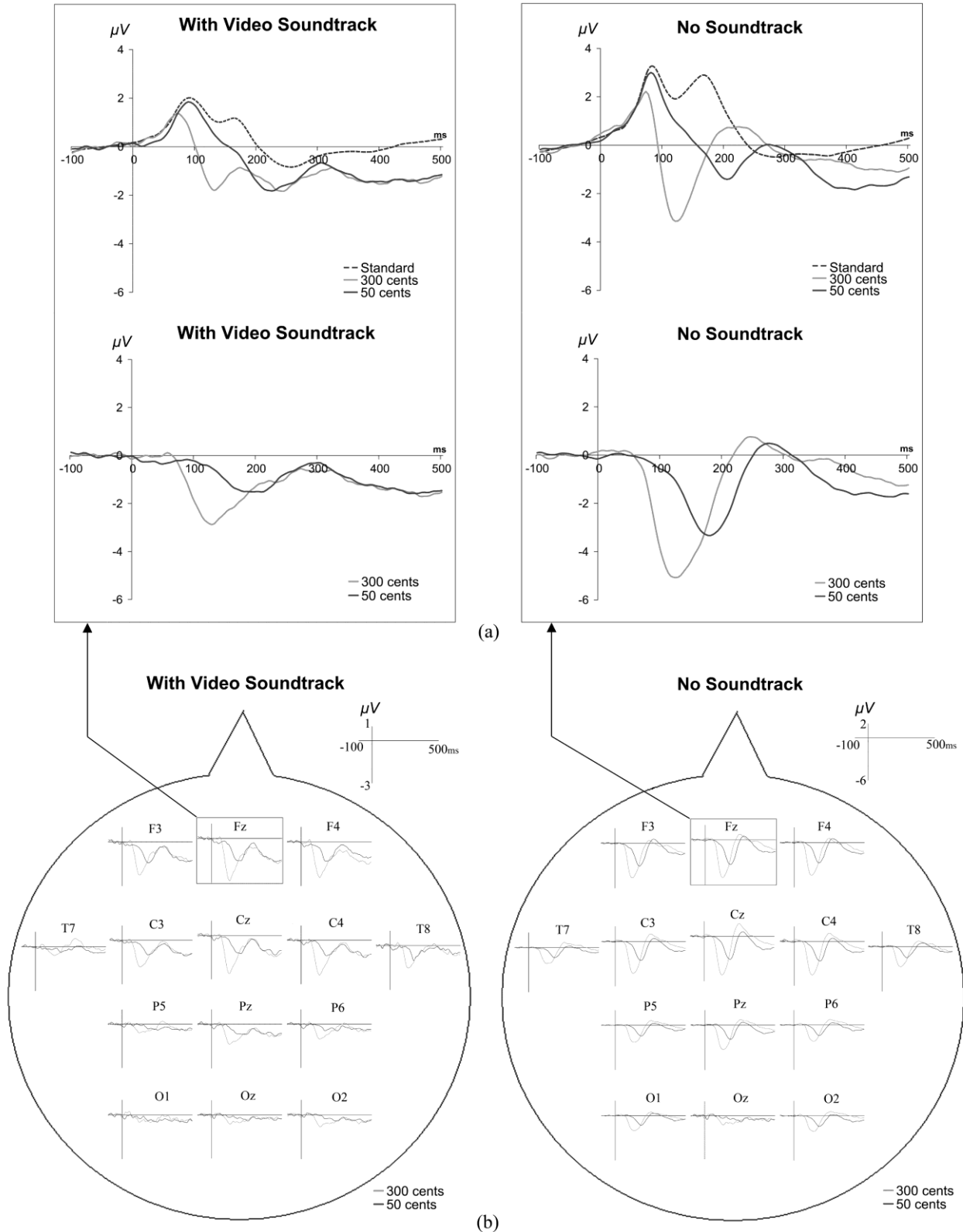


Figure 2

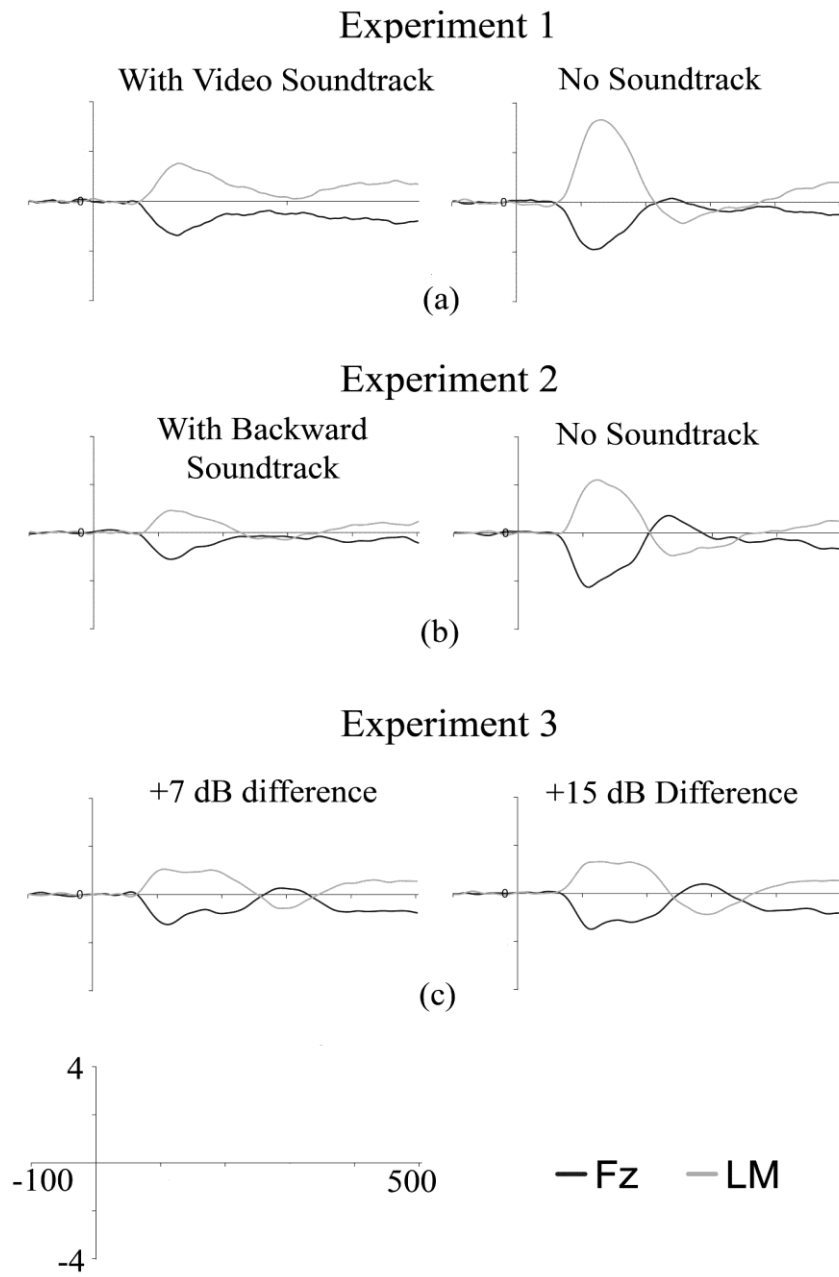


Figure 3

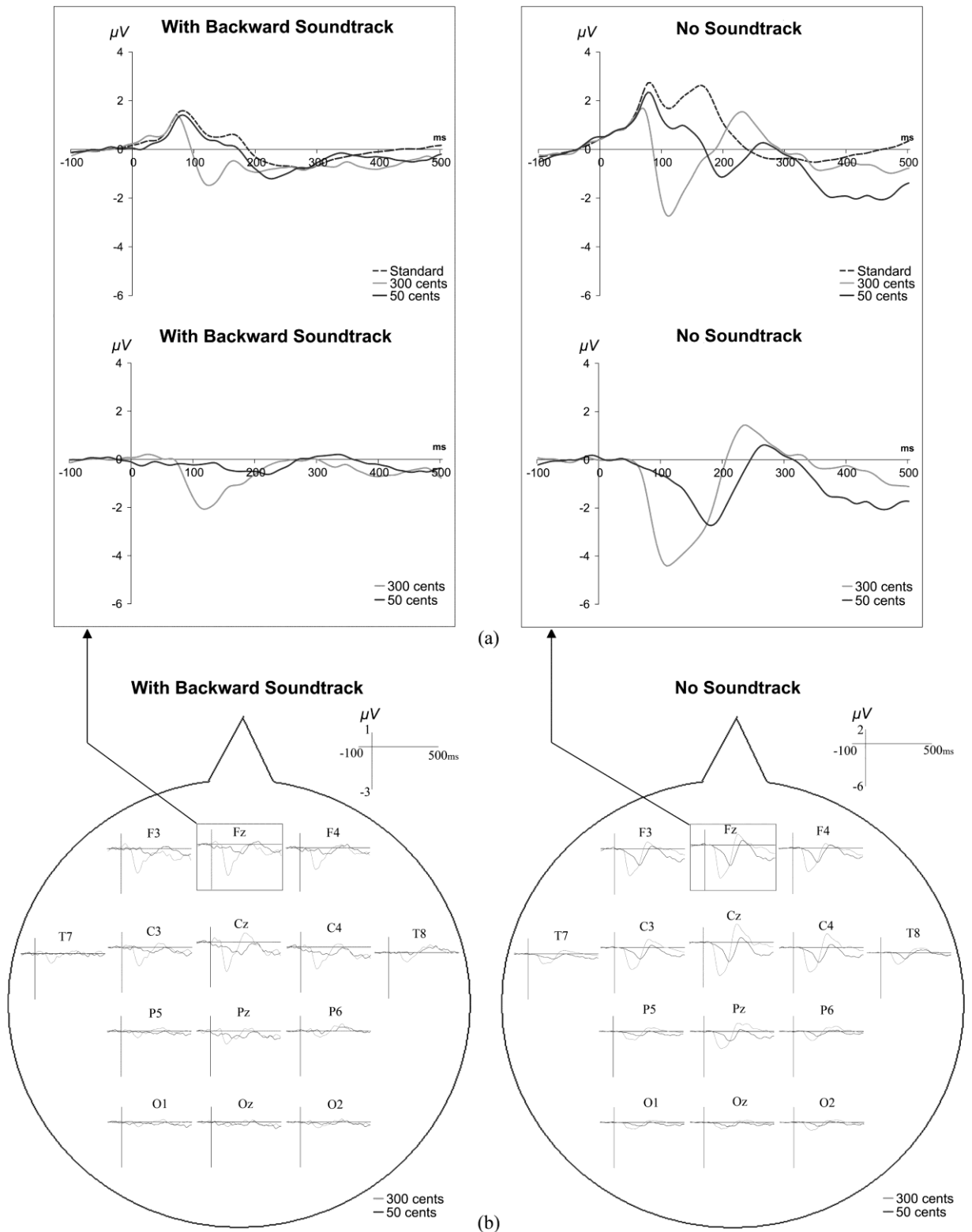
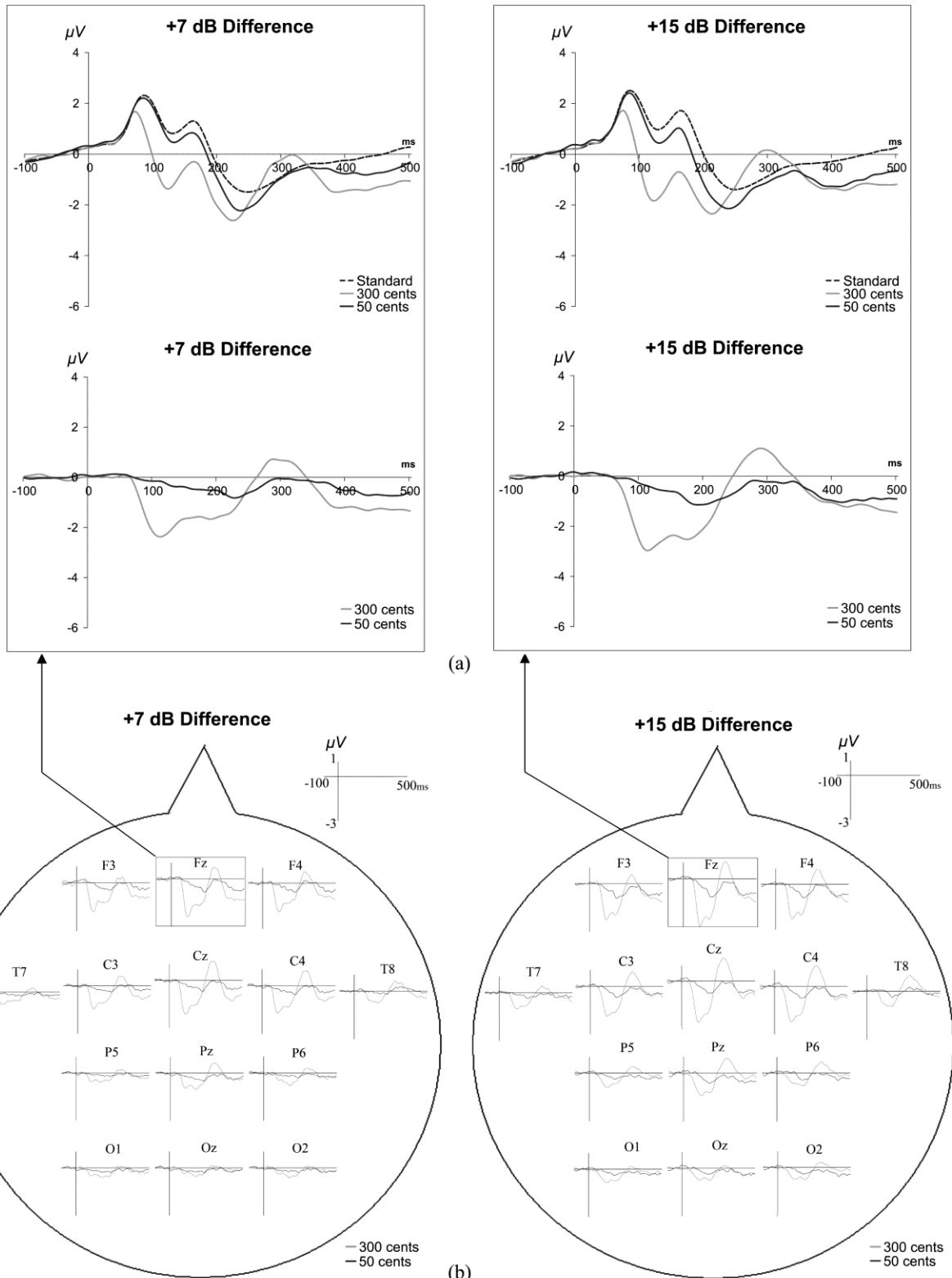


Figure 4



3.2. Article II

PITCH DISCRIMINATION WITHOUT AWARENESS IN CONGENITAL AMUSIA: EVIDENCE FROM EVENT-RELATED POTENTIALS

Patricia Moreau, Pierre Jolicœur et Isabelle Peretz

Article publié dans: *Brain and Cognition* (2013) 81, 337-344

Pitch discrimination without awareness in congenital amusia: Evidence from event-related potentials

Patricia Moreau^a, Pierre Jolicœur^a, and Isabelle Peretz^a

a. International Laboratory for Brain, Music, and Sound Research (BRAMS), Department of Psychology, University of Montreal, Canada

CORRESPONDENCE TO:

Patricia Moreau

BRAMS, Université de Montréal

Pavillon 1420 Boul. Mont-Royal

CP 6128, Succ. Centre-ville

Montreal, Qc, Canada

H3C 3J7

e-mail:

ABSTRACT

Congenital amusia is a lifelong disorder characterized by a difficulty in perceiving and producing music despite normal intelligence and hearing. Behavioral data have indicated that it originates from a deficit in fine-grained pitch discrimination, and is expressed by the absence of a P3b event-related brain response for pitch differences smaller than a semitone and a bigger N2b-P3b brain response for large pitch differences as compared to controls. However, it is still unclear why the amusic brain overreacts to large pitch changes. Furthermore, another electrophysiological study indicates that the amusic brain can respond to changes in melodies as small as a quarter-tone, without awareness, by exhibiting a normal mismatch negativity (MMN) brain response. Here, we re-examine the event-related N2b-P3b components with the aim to clarify the cause of the larger amplitude observed by Peretz et al (2005), by experimentally matching the number of deviants presented to the controls according to the number of deviants detected by amusics. We also re-examine the MMN component as well as the N1 in an acoustical context to investigate further the pitch discrimination deficit underlying congenital amusia. In two separate conditions, namely ignore and attend, we measured the MMN, the N1, the N2b and the P3b to tones that deviated by an eighth of a tone (25 cents) or whole tone (200 cents) from a repeated standard tone. The results show a normal MMN, a seemingly normal N1, a normal P3b for the 200 cents pitch deviance, and no P3b for the small 25 cents pitch differences in amusics. These results indicate that the amusic brain responds to small pitch differences at a pre-attentive level of perception, but is unable to detect consciously those same pitch deviances at a later attentive level. The results are consistent with previous MRI and fMRI studies indicating that the auditory cortex of amusic individuals is functioning normally.

Keywords : Congenital amusia, pitch perception, auditory ERPs

1. INTRODUCTION

Humans appear to be born musical, but some individuals are unable to enjoy and produce music despite normal exposure to it. This condition is now known as congenital amusia, a lifelong developmental disorder (Peretz, 2001), that has been estimated to affect about 4% of the population.

Recent studies have demonstrated that congenital amusia can be explained by a deficit in fine-grained pitch discrimination. In a study particularly relevant to the present one, Hyde and Peretz (2004) presented an oddball paradigm composed of sequences of five 100 ms long isochronous identical tones with an inter-stimulus interval of 250 ms, in which the fourth tone differed or not from the other tones of the sequence by one of five pitch differences, ranging from 25 to 300 cents (100 cents = 1 semitone). Amusics and their matched controls had to indicate whether they detected or not a change. The results showed that typically, amusics cannot detect pitch variations smaller than a semitone despite normal hearing. In further brain imaging studies, the music deficit underlying congenital amusia has been related to brain anomalies in white and grey matter of the auditory cortex, the inferior frontal cortex, as well as in the arcuate fasciculus (Hyde et al., 2006, 2007; Loui et al., 2009), and is expressed by an abnormal connectivity between the auditory cortex and the inferior frontal cortex (Hyde et al., 2011). Abnormal brain electrical activity in amusics has also been observed by Peretz et al. (2005), who presented the same stimuli as used by Hyde and Peretz (2004) while recording brain evoked potentials. They observed the absence of a normal P3b event-related potential (ERP) component to small pitch changes as well as a larger N2b and P3b component in response to pitch differences that were greater than a semitone, which they interpreted as an

indication that the brain anomaly underlying congenital amusia may lie outside the auditory cortex along the auditory pathway. In another study, Peretz et al. (2009) presented amusics and controls with melodies in which they had to determine whether it contained a pitch anomaly. The results showed that amusics exhibited a normal mismatch negativity (MMN) ERP component but no normal P3b in response to the melodic incongruities. These results suggested that the amusic brain can detect small pitch anomalies without awareness.

The MMN, N2b, and P3b ERP components reflect pitch-dependent variations in brain activity at various levels of processing along the auditory pathways. Namely, the auditory MMN is taken to reflect the preconscious processing of changes, for example in frequency or intensity, in a continuous stream of identical sounds, and is associated with brain activity in the auditory cortex which may involve frontal regions as well (Näätänen & Winkler, 1999). The auditory N2b reflects deviance detection and is only observed when attention is dedicated to the targets (Folstein & Van Petten, 2008). The N2b is ascribed to activity of the supratemporal auditory cortex (e.g., Bruneau & Gomot, 1998). The P3b is also associated with the conscious discrimination of task-relevant targets in a repeating sequence of distractors and is typically associated with multiple generators over the parietal and cingulate cortex as well as in prefrontal regions (e.g., Linden, 2005).

Although ERP and brain imaging data appear to converge in attributing the neural anomaly underlying congenital amusia to an impoverished connectivity between the auditory cortex and the inferior frontal cortex, it is still unclear why the amusic brain overreacted to large, well-detected, pitch changes in the study of Peretz et al. (2005). One could argue that

the recruitment of larger populations of neurons may be needed in amusics' brains, resulting in a greater N2b-P3b response. On the other hand, the N2b and P3b are ERP components known to vary in amplitude as a function of the probability of occurrence of the pitch changes (Donchin, 1981; Donchin et al, 1986; Näätänen & Picton, 1986), namely by showing greater amplitude as the pitch change frequency of occurrence decreases. In the Peretz et al.'s (2005) study, amusic subjects did not perceive pitch changes as frequently as controls, and this difference changed the relative probability of perceived pitch changes. The larger N2b–P3b response observed in amusics to large pitch changes, relative to controls, may thus have reflected the increased rarity of perceived changes in the context of the experimental session. If so, the larger N2b–P3b response observed in amusics should not be interpreted to reflect physiological differences to large pitch changes, *per se*, relative to controls, but rather as an indirect reflection of their inability to perceive the small pitch changes.

The goal of this study was to evaluate brain electrical responses to pitch changes in a single experiment by measuring preattentive and attentive brain responses for small pitch changes in amusics and controls. Furthermore, we sought to clarify the cause of the greater N2b–P3b previously observed in amusics in response to large pitch changes. This goal was achieved by controlling the frequency of occurrence of perceived pitch changes using a matching procedure that equated this frequency across amusics and controls. We predicted that amusics would show a normal MMN and a normal P3b for the large pitch changes, but an abnormal P3b to small pitch differences.

2. METHOD

2.1. Participants

Ten amusic participants and ten controls matched for age, gender, education, and musical experience participated to the study. The participants were considered amusic or not on the basis of their scores on the Montreal Battery of Evaluation of Amusia (MBEA; Peretz et al., 2003). The MBEA is composed of 6 tests (180 trials) that evaluate various music processing components. The participants were considered amusic if their global MBEA score fell two standard deviations or more below the mean global score of the control group. Both groups had normal hearing relative to their age as determined by an audiometric test (around 40 dB HL at 1000 Hz), and no participant had previous neurological or psychiatric history. The characteristics of the participants are presented in Table 1. The protocol was vetted by an institutional committee at Université de Montréal.

[Insert Table 1 around here]

2.2. Materials and procedure

2.2.1. Auditory stimulation

The auditory stimuli were piano notes created with specialized software (Sibelius 5.0, exported as wave files using KontaktPlayer 2, from Native Instrument, running the Sibelius Sounds Essentials samples). The wave files had a duration of 100 ms (rise and fall of 10 ms) and were normalized in energy with Adobe Audition V3.0 at 44.1 kHz in 16-bit format. The sounds were used in two conditions in which a frequent standard tone was played at a pitch level of C6 (1047 Hz). The rare deviant tones were lower or higher in pitch than the standard

tone by 25 cents (1032 or 1062 Hz) or 200 cents (933 or 1175 Hz; 100 cents corresponds to one semitone). In the ignore condition, the participants were instructed to ignore the auditory stimulation and to watch a self-selected movie presented with subtitles with the sound track turned off. The sequence of tones contained 2736 standard tones (probability of occurrence = .9) and 76 tones of each of the four pitch deviances (probability of occurrence = .025) for a total of 3040 sounds presented at a fixed inter-tones interval of 400 ms (SOA = 500 ms) in two blocks, allowing for a short pause in-between, and lasting 25 minutes in total. The presentation of the sounds was pseudo-randomized so that every deviant tone was preceded by at least four standard tones. In this experiment, we did not use deviants as standards and vice versa because we used five different deviants; replacing standards by each deviant would have been too long for the participants, who are relatively old.

The attend condition was always presented after the ignore condition, to avoid conscious switches of attention to pitch differences. Indeed, the attend condition made participants aware of the nature of the auditory stimulation and of the size of the pitch changes, in particular. In the attend condition, participants were presented with sequences of five tones, using the same sounds as in the ignore condition, with an inter-tone interval of 250 ms (SOA of 350 ms)¹ and a pause of two seconds between each sequence. Standard sequences were composed of five standard tones. Deviant sequences comprised 3 standards followed by a deviant and a standard. The pitch of the deviant fourth tone was displaced upward or downward by 25 or 200 cents. The standard and deviant sequences were randomly mixed. The participants were presented with a total of 240 sequences. For the amusics, there were 120 standard sequences and 30 of each of the four deviant sequences. For the control subjects, the

number of deviant sequences was matched to the number of deviants correctly detected by the amusics. Because controls do not always detect 100% of the deviant sounds presented (i.e., they miss, on average, 12% of the 25 cents changes and 2% of the 200 cents changes), two deviant sequences of 25 cents and one sequence of 200 cents pitch deviant were systematically added to the matched number of sequences presented to the controls (see Table 2). The total number of sequences presented (240) remained unchanged. The task lasted 19 minutes for both controls and amusics. Each control was yoked to a particular amusic. For example, if amusic #1 correctly detected all 200 cents deviants (60 trials) and 19 of the 25 cents deviants (out of 60 trials), control #1 was presented with 60 +1 200 cents sequence, 19 +2 25 cents sequences and 158 standard sequences, thus matching the frequency of detected changes for the yoked amusic.

The participants were informed of the position in the sequence where a change could occur. They were instructed to press a button when they perceived a different pitch in the fourth tone and to press a different button when they perceived no difference. There was no feedback. Feedback was only given during the practice trials, which comprised one standard sequence and each of the four deviant sequences presented in a random order. Participants could repeat the practice trials as often as they wished, but they did not exceed two blocks of practice trials. Participants were asked to blink between the sequences, to focus on their hands, and to remain relaxed. Throughout the testing session, the sounds were presented binaurally through headphones and the intensity level was adjusted to each individual's hearing level for an average intensity level of presentation of 70 dB SPL. The whole experimental session,

including the ignore and the attend condition, lasted approximately 40 minutes, following the electrode installation which lasted about 30 minutes.

2.2.2. EEG recording parameters and analysis

The subjects were seated in an electrically shielded and sound-attenuated chamber. The electroencephalogram (EEG) was recorded (bandpass, 0.05–70 Hz; sampling rate, 256 Hz; impedance < 5 K Ω) via a Neuroscan amplifier (Neuroscan SynAmps², Compumedics, El Paso, TX) from 66 electrodes at the standard 10–10 scalp sites referenced online to the tip of the nose. Bipolar electrode pairs monitored horizontal and vertical electrooculograms (EOG). Offline, the EEG data were corrected for eye movement (Semlitsch et al., 1986), and the signal was filtered (bandpass, 0.05–30 Hz, 24 dB/octave). An artifact rejection was conducted on all EEG channels except for the EOG (criteria of $\pm 100 \mu\text{V}$; average rejection rate of 6.32% and 4.76% in amusics and controls, respectively; artifact rejection was similar across conditions). The data were then divided into epochs of 600 ms including a 100 ms pre-stimulus interval for baseline correction and re-referenced to the averaged mastoids. In both conditions (ignore and attend), separate averages were computed for the standard tones and for pitch deviances (25 cents and 200 cents). Type 1 errors associated with inhomogeneity of variance were controlled by decreasing the degrees of freedom using the Greenhouse-Geisser epsilon. The original degrees of freedom are reported for all statistical analyses.

3. RESULTS

The results are first presented in the ignore condition, in which the MMN component was analyzed, and then in the attend condition, in which the auditory P3b component was

analyzed. The auditory N1 component recorded in both the ignore and the attend conditions will be presented in the last section.

3.1. Ignore condition

Before subtracting the standard ERP waveform to those of the deviants in order to compute the MMN, the standard waveforms were compared in amusics and controls to ensure that both groups shared similar subtraction baselines. An independent *t*-test run on the measures of amplitude of the standard waveforms, calculated as the mean amplitude over a window ranging from 140 ms to 300 ms and corresponding to the detection window of the MMN, yielded no significant difference ($t(18) = .84, p > .41$). Therefore, the analyses were performed on the subtracted waveforms. The MMN amplitudes were quantified by computing the mean amplitude over a 40 ms window centered at the grand average peak latency detected within a time window of 140 to 300 ms, and the latency was measured as the time point of peak amplitude. The results are reported for electrode Fz where the MMN amplitude was the largest (Figure 1).

As can be seen in Figure 1, amusics and controls obtained similar MMNs. Except for the upward 25 cents pitch deviance which was not significantly different from zero in amusics ($t(9) = .54, p > .6$), all the other MMNs differed from zero. The ANOVA yielded a significant interaction of pitch direction by group with $F(1, 18) = 7.13, p < .02$. As can be seen in Figure 1c, eight amusics out of ten have a MMN for the 25 cents downward pitch difference and five amusics out of ten also show a MMN for the upward 25 cents deviance, showing that the majority of the amusics do respond to the 25 cents pitch difference and preferentially to the

downward 25 cents pitch difference. As expected, a main effect of the size of the pitch difference (25 vs. 200 cents) was found, with $F(1, 18) = 97.25, p < .0001$, confirming that the MMN for the 25 cents pitch deviance was smaller in amplitude than the MMN for the 200 cents deviance. The ANOVA on peak-latency measures only revealed an effect of the size of the pitch difference, $F(1, 18) = 73.06, p < .0001$, reflecting the later peak for the 25 cents MMN than for the 200 cents MMN².

[Insert Figure 1 around here]

The MMN scalp topographies are depicted in Figure 2a and were analyzed for the 200 cents pitch deviance³. Originally, the EEG was recorded using 66 electrodes, but in the topographical analyses, we chose the eight electrodes of the midline for the anteriority effect, and four fronto-central electrodes, where the MMN amplitude was the largest, in each hemisphere for the laterality effect. Both groups showed a clear anteriority effect by obtaining larger MMN towards the pooled frontal electrodes (FPz, Fz, FCz, and Cz; $M = -2.21$) compared to the pooled posterior electrodes (CPz, Pz, Poz, and Oz; $M = -1.13$) for both pitch directions, $F(1, 18) = 74.97, p < .0001$. No laterality effect was observed between the pooled left hemisphere electrodes (F4, F6, FC4, and FC6) and the pooled right hemisphere electrodes (F3, F5, FC3, and FC5). In the results presented here, we used a mean mastoid reference in order to capture both sides of the electrical fields produced by the MMN generators at the sites of analysis (e.g., Fz). However, separate analyses that maintained the nose reference revealed a clear inversion of the MMN between vertex electrodes (e.g., Fz) and the mastoids.

[Insert Figure 2 around here]

3.2. Attend condition

Amusics detected few 25 cents deviant tones (Table 2). Thus, the amplitude of the P3b, calculated as an average over a window ranging from 300 to 500 ms and computed on the correct responses, was variable. To reduce this variability, we identified outliers, before running the analysis of variance, according to the following procedure. The amplitude of the P3b of each participant was compared to the group mean amplitude. The participant whose P3b amplitude was either the biggest or the smallest and thus was the furthest away from the group mean in microvolts was temporarily excluded and the mean and standard deviation were re-calculated for the remaining participants. If the temporarily excluded participant differed from the new mean by more than 3.5 standard deviations, it was considered an outlier and permanently excluded. The procedure was run iteratively as long as outliers were found. The outlier rejection criterion varies as a function of group size, with standard deviations needed to reject a participant increasing as the number of remaining participants decreases (see Van Selst & Jolicoeur, 1994, for a computational simulation). This procedure led to the rejection of two amusics (A-03 and A-07 in Table 1) and one control (C-05). The behavioral data of these discarded participants were not atypical since their performance did not exceed two standard deviations from the mean of the group and thus could not explain the atypical brain waves observed here. Because these two amusics and the control participants were experimentally matched for the frequency of detection of the 25 cents deviants to other participants, we only analyzed the behavioral data and the P3b obtained in the data of seven amusics and seven matched controls.

3.2.1. Behavioral results

The behavioral results confirmed that the seven amusics had lower detection accuracy for the 25 cents pitch changes (average percentage of correct response = 26.4%), compared to their yoked controls (91.1%), $t(12) = 8.56, p < .0001$. In contrast, the 200 cents pitch deviance was detected with equal accuracy, 96.2% and 97.9% for the amusics and controls, respectively, $t(12) = .46, p > .65$. This pattern was also reflected in analyses of hits minus false alarms, which produced an interaction between the size of the pitch difference (25 vs. 100 cents) and group in an ANOVA, $F(1, 12) = 53.14, p < .0001$. The results did not vary as a function of pitch direction, $F(1, 12) = 2.52, p > .13$.

[Insert Table 2 about here]

3.2.2. P3b

The P3b data obtained in the attend condition were computed on the correct responses and reported at the electrode Cz where the amplitudes were the largest (Figure 3). The following analyses will only focus on the P3b component because no N2b ERP component was observed in amusics and controls. In controls, the P3b amplitude obtained for upward and downward pitch changes did not vary (all $F < 1$) nor did it vary for the 200 cents in amusics ($p > .95$). Therefore, upward and downward pitch differences were averaged together in order to generate a single P3b waveform for the 25 cents and 200 cents pitch deviations.

As can be seen in Figure 3, there was no P3b for the 25 cents pitch changes in amusics, as revealed by a non-significant t -test against zero conducted on the measures of amplitude,

$t(6) = .52, p > .62$, while the P3b significantly differed from zero in controls with $t(6) = 3.16, p < .05$. The ANOVA run on the measures of amplitude revealed a significant interaction between size of the pitch difference and group, $F(2, 21) = 4.17, p < .03$. The analysis of the simple effects with unilateral independent t -tests confirmed that the amusics differed from controls for the 25 cents pitch changes, with $t(12) = 2.79, p < .02$, but not for the 200 cents pitch difference, $t(12) = .16, p > .44$, nor for the standard tone, $t(12) = .63, p > .27$. The mean peak latency of the P3b for the 200 cents changes did not differ between groups, $t(12) = .66, p > .52$. The P3b amplitude results have been analyzed in relation to the behavioral data but we could not find any significant correlation (all $ps > .05$).

The scalp topographies of the P3b for the 200 cents pitch deviance are depicted in Figure 2b and revealed no significant lateralization effect between the pooled left hemisphere electrodes (C3, C5, CP3 and CP5) and the pooled right hemisphere electrodes (C4, C6, CP4, and CP6; $F < 1$), nor any significant anteriority effect between the pooled frontal electrodes (FPz, Fz, FCz, and Cz) and the pooled posterior electrodes (CPz, Pz, POz, and Oz; $F < 1$).

[Insert Figure 3 around here]

3.3. N1

The analysis of N1, for the entire sample ($N = 20$; Figure 4)⁴, was based on the first 1080 standard tones presented during the ignore condition to equate the number of standard tones analyzed in the attend condition for comparison. To avoid contamination of the ERP wave by the deviant tones, the standard tones following a deviant tone were rejected from the

analysis. The N1 was computed at Cz, where it was the largest, as the mean amplitude over a 40 ms window centered at the grand average peak, detected between 90 and 130 ms after tone onset, and the latency was measured as the time point of peak amplitude. As shown in Figure 4, amusics seem to show a smaller N1 than controls but this difference was not statistically significant, $t(18) = 1.27, p > .22$; nor on latencies, $t(18) = 1.48, p > .16$.

In order to examine the N1 attenuation over time, the data were divided in three parts by dividing the data in three blocks containing the same number of sounds. The ANOVA yielded no significant interaction ($p > .72$), nor any significant main effect of group ($p > .20$), but a significant main effect of block, with $F(2, 36) = 5.75, p > .007$, indicating that in both amusics and controls, N1 amplitude decreased over time, with a significantly smaller amplitude in the second ($p < .01$) and the third blocks ($p < .05$) as compared to the first block.

[Insert Figure 4 around here]

In the attend condition, the N1 was also analyzed for the entire sample ($N = 20$; Figure 4) and revealed no difference between groups on amplitude, $t(18) = 1.43, p > .17$, or latency, $t(18) = .94, p > .36$. As observed in the ignore condition, the attenuation of N1 over the blocks was also found here, $F(2, 36) = 8.47, p < .001$. The interaction between block and Group was not significant ($F = (2, 36) = .02; p > .97$).

As seen in Figure 4, the N1 appeared to be larger in the attend than in the ignore condition. An ANOVA was run on the amplitude of the N1 with condition (attend and ignore)

as a within-subject factor and group (amusics and controls) as a between-subjects factor. The analysis yielded no significant interaction ($p > .69$), nor any significant effect of group ($p > .16$), but a significant main effect of condition was found with $F(1, 18) = 95.00, p < .0001$, revealing that the N1 amplitude was larger in the attend condition ($M = -1.86; SD = 1.21$) than in the ignore condition ($M = -.04; SD = 1.08$).

The N1 appeared central with no significant laterality effect in the attend ($F < 1$) or ignore condition ($F < 1$) in both groups, but it was slightly more anterior in the attend condition, $F(1, 18) = 12.21, p < .003$.

4. DISCUSSION AND CONCLUSION

As found in earlier studies (Hyde & Peretz, 2004; Peretz et al., 2005), the present study shows that congenital amusia is associated to a deficit in discrimination of pitch differences smaller than a semitone. Importantly, this deficit is visible not only in behavior but also in a specific pattern of brain electrical activity that brings a better understanding of the neurodynamic functioning of amusics' pitch change perception. When a pitch deviance occurs in a stream of identical isochronous sounds, the amusic brain seems to react appropriately at early unconscious levels of processing, by eliciting a normal MMN. This finding of perception without awareness falls in line with a previous study in which amusics exhibit a normal MMN in a melodic context (Peretz et al., 2009). Normal perception without awareness is also consistent with the finding that amusics can implicitly learn statistical regularities in tonal sequences (Omigie & Stewart, 2011 but see Peretz et al., 2012 for negative results) and implicitly process subtle differences in harmonic structure (Tillman et al., 2012). However, as

the information travels along the auditory pathways, crucial neuronal activity appears to be lost so that small pitch changes do not reach the higher conscious levels of processing, as suggested here by the absence of the P3b for small pitch deviances. This pitch perception deficit cannot be explained by a lack of attentional resources or a general unresponsiveness to pitch variations because pitch changes greater than a semitone are correctly detected and generate a normal P3b brain response in amusics.

More importantly, the present study shows that the larger P3b response observed by Peretz et al. (2005) in amusics as compared to normal controls most likely results from an inequality in the probabilities of *perceived* pitch changes across groups. Here, we matched the frequency of *perceived* events between the amusics and the controls, by taking into account the lower probability of detection of small pitch changes by amusics. However, the matching procedure may have disadvantaged the controls not only because there was less room for showing “unconscious pitch processing effects” in the attend condition but also because there were very few trials that contained a 25 cents pitch change. Nevertheless, in these difficult conditions, controls showed a reliable P3b. Thus, when frequency of detection is taken into account and controlled for, the P3b response to large pitch changes no longer differs between amusics and controls. One could argue that the data in the attend condition may have been noisier and more variable because there were less standard and deviant sounds as compared to the ignore condition. Nevertheless, a reliable P3b was obtained for the 25 cents deviants in controls, suggesting enough sensitivity of the paradigm. Yet, amusics who *perceived* as many 25 cents changes as controls did not show any evidence of a P3b. It remains to be tested whether amusics with repeated exposure and training may detect fine-grained pitch differences

better and exhibit a near-normal P3b. This should be the goal of further testing, especially in children when the brain is more plastic (Mignaut Goulet et al., 2012).

In conclusion, the present study brought light on the mechanisms of perception underlying the fine-grained pitch deficit at the origin of congenital amusia by showing that small pitch changes have an effect on brain activity at early unconscious stages of processing, but do not reach higher levels of conscious processing. To the extent that changes in the amplitude of brain responses could be considered as evidence that stimulus differences were registered, and in some sense perceived, the present results may constitute another example of perception without awareness of pitch deviations by the amusic brain (see Loui et al., 2008; Peretz et al., 2009, for similar findings).

ACKNOWLEDGEMENT

This work was supported by grants from the Canadian Institutes of Health Research (I.P. & P.M) and a Canada Research Chair to IP. We wish to thank Mihaela Felezeau and Nicolas Robitaille for their help in testing the subjects and for insightful comments concerning the analysis of the data. An abstract with preliminary results has been published in the Annals of the New York Academy of Sciences by Moreau et al. (2009).

REFERENCES

- Bruneau, N., & Gomot, M., 1998. *Auditory evoked potentials (N1 wave) as indices of cortical development*. In B. Garreau (Ed.), *Neuroimaging in child neuropsychiatric disorders*. Springer, Berlin, pp. 113–124.
- Donchin, E. (1981). Presidential address, 1980. Surprise!...Surprise? *Psychophysiology*, 18(5), 493-513.
- Donchin, E., Miller, G. A., & Farwell, L. A. (1986). The endogenous components of the event-related potential--a diagnostic tool? *Prog Brain Res*, 70, 87-102.
- Duncan, C.C., Barry, R.J., Connolly, J.F., Fisher, C., Michie, P.T., Näätänen, R., Polich, J., Reinvang, I., & Van Petten, C. (2009). Event-related potentials in clinical research: Guidelines for eliciting, recording, and quantifying mismatch negativity, P300, and N400. *Clin Neurophysiol*, 120, 1883-1908.
- Folstein, J.R., & Van Petten, C. (2008). Influence of cognitive control and mismatch on the N2 Component of the ERP: A review. *Psychophysiology*, 45, 152-170.
- Hyde, K. L., Lerch, J. P., Zatorre, R. J., Griffiths, T. D., Evans, A. C., & Peretz, I. (2007). Cortical thickness in congenital amusia: when less is better than more. *J Neurosci*, 27(47), 13028-13032.
- Hyde, K. L., & Peretz, I. (2004). Brains that are out of tune but in time. *Psychol Sci*, 15(5), 356-360.
- Hyde, K. L., Zatorre, R. J., Griffiths, T. D., Lerch, J. P., & Peretz, I. (2006). Morphometry of the amusic brain: a two-site study. *Brain*, 129(Pt 10), 2562-2570.

- Hyde, K. L., Zatorre, R. J., & Peretz, I. (2011). Functional MRI evidence of an abnormal neural network for pitch processing in congenital amusia. *Cereb Cortex*, 21(2), 292-299.
- Kujala, T., Tervaniemi, M., & Schröger, E. (2007). The mismatch negativity in cognitive and clinical neuroscience: Theoretical and methodological considerations. *Biol Psychol*, 74, 1-19.
- Linden, D. E. (2005). The p300: where in the brain is it produced and what does it tell us? *Neuroscientist*, 11(6), 563-576.
- Loui, P., Alsop, D., & Schlaug, G. (2009). Tone deafness: a new disconnection syndrome? *J Neurosci*, 29(33), 10215-10220.
- Loui, P., Guenther, F. H., Mathys, C., & Schlaug, G. (2008). Action-perception mismatch in tone-deafness. *Curr Biol*, 18(8), R331-332.
- Mignault Goulet, G., Moreau, P., Robitaille, N., & Peretz, I. (2012). Congenital Amusia Persists in the Developing Brain after Daily Music Listening. *PLoS ONE*, 7(5), e36860.
- Moreau, P., Jolicoeur, P., & Peretz, I. (2009). Automatic brain responses to pitch changes in congenital amusia. *Ann N Y Acad Sci*, 1169, 191-194.
- Näätänen, R., & Picton, T. W. (1986). N2 and automatic versus controlled processes. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol Suppl*, 38, 169-186.
- Näätänen, R., & Winkler, I. (1999). The concept of auditory stimulus representation in cognitive neuroscience. *Psychol Bull*, 125(6), 826-859.
- Omigie, D., & Stewart, L. (2011). Preserved statistical learning of tonal and linguistic material in congenital amusia. *Front. Psychology*, 2, 1-11.

- Peretz, I. (2001). Brain specialization for music. New evidence from congenital amusia. *Ann N Y Acad Sci*, 930, 153-165.
- Peretz, I., Brattico, E., Jarvenpaa, M., & Tervaniemi, M. (2009). The amusic brain: in tune, out of key, and unaware. *Brain*, 132(Pt 5), 1277-1286.
- Peretz, I., Brattico, E., & Tervaniemi, M. (2005). Abnormal electrical brain responses to pitch in congenital amusia. *Ann Neurol*, 58(3), 478-482.
- Peretz, I., Champod, A. S., & Hyde, K. (2003). Varieties of musical disorders. The Montreal Battery of Evaluation of Amusia. *Ann N Y Acad Sci*, 999, 58-75.
- Peretz, I., Saffran, J., Schön, D., & Gosselin, N. (2012). Statistical learning of speech, not music, in congenital amusia. *Ann N Y Acad Sci*, 1252, 361-367.
- Semlitsch, H. V., Anderer, P., Schuster, P., & Presslich, O. (1986). A solution for reliable and valid reduction of ocular artifacts, applied to the P300 ERP. *Psychophysiology*, 23(6), 695-703.
- Van Selst, M. and Jolicoeur, P. (1994). A solution to the effect of sample size on outlier elimination. *Exp Psychol Soc*, 47, 631-650.

FOOTNOTES

¹ The experimental paradigms differed slightly in each condition because we wanted to maximize the quality of the brain response recordings and allow comparison with previous data. In the attend condition, the inter-tone interval was chosen to match the one used in the previous study by Peretz et al. (2005) because our main goal was to clarify the origins of the greater N2 and P3 ERP components observed in amusics in responses to large pitch changes in 2005. Unfortunately, these parameters are not well suited to study the MMN. In fact, the MMN is best recorded with longer inter-tone intervals (around 400 ms or more; Kujala et al., 2007) and more sounds before a deviant are needed in order to observe a reliable MMN (Duncan et al., 2009). Nevertheless, these adaptations to the paradigm are not expected to influence the result, as suggested by the similar results of a follow up experiment in which the inter-tone interval was matched between the attend and the ignore conditions (Mignault-Goulet et al., 2012).

² The MMN obtained in the 14 participants (7 amusics and 7 controls) considered for the P3b analyses were similar to those obtained with the entire sample. The ANOVA yielded a significant interaction of pitch direction by group, with $F(1, 12) = 6.33, p < .03$. A main effect of the size of the pitch difference (25 vs. 100 cents) was also found, with $F(1, 12) = 62.62, p < .0001$. All other effects were not significant, all $ps > .07$.

³ The MMN scalp topographies were analyzed in both groups for the 200 cents pitch deviance only because the MMN obtained for the 25 cents condition was not present in all subjects.

⁴ As for the MMN, the N1 of the 6 excluded participants in the P3b analysis was normal and thus was kept in the analyses.

TABLES

Table 1

Characteristics of the participants, global percentage score on the Montreal Battery of Evaluation of Amusia (MBEA) with standard deviations calculated relative to the controls' mean score in parentheses

	Age (yrs)	Gender	Education (yrs)	Musical experience (yrs)	MBEA (%)
Amusics					
A-01	65	M	19	1	51.33 (-8.7)
A-02	66	F	14	2	68 (-4.8)
* A-03	66	F	21	4	70 (-4.4)
A-04	68	F	15	2	68 (-4.8)
* A-05	64	M	14	1	60 (-6.7)
A-06	62	F	20	1	72.67 (-3.8)
* A-07	67	M	19	1	55.33 (-7.8)
A-08	58	F	19	3	59.33 (-6.9)
A-09	59	M	19	1	63 (-6)
A-10	72	M	15	1	66.67 (-5.1)
<i>M</i>	64.7	---	17.5	1.7	63.4 (-5.9)
Controls					
C-01	68	M	16	1	86.67 (-0.5)
C-02	64	F	18	2	94 (1.2)
* C-03	64	F	19	2	90.67 (0.4)
C-04	68	F	15	4	90 (0.3)
* C-05	65	M	16	3	93 (1)
C-06	63	F	15	1	93 (1)
* C-07	67	M	13	1	81 (-1.8)
C-08	59	F	16	3	88.67 (0.0)
C-09	65	M	12	1	87.78 (-0.2)
C-10	72	M	16	2	83 (-1.3)
<i>M</i>	65.5	5F	15.6	2.1	88.8 (4.3)
<i>t</i> -tests	n.s.	---	n.s.	n.s.	$p < .001$

Note. * Indicates participants who were excluded in the analyses of the P3b. Significance levels on corresponding *t*-tests; 'n.s.' refers to a non-significant difference ($p > .05$).

Table 2

Average number of sounds presented and detected by seven amusics and their seven yoked controls in the Attend condition for the standard tone, the 25 and the 200 cents pitch differences. False alarms correspond to a “yes, there was a change” for standard sequences (which contain no change). Standard deviations are in parentheses.

	Amusics (N = 7)	Controls (N = 7)
<hr/>		
25 cents upward		
Presented	30 (0.0)	10.6 (8.4)
Detected	9.1 (7.2)	9.9 (8.3)
25 cents downward		
Presented	30 (0.0)	7.1 (4.1)
Detected	6.7 (4.7)	5.7 (3.3)
200 cents upward		
Presented	30 (0.0)	30 (0.0)
Detected	29.1 (2.3)	29.4 (1.1)
200 cents downward		
Presented	30 (0.0)	30 (0.0)
Detected	28.6 (3.4)	29.4 (0.8)
Standard		
Presented*	120 (0.0)	154.6 (24.4)
Detected	114.1 (10.8)	147.6 (24.0)
False alarms	5.57 (10.8)	7.0 (8.6)
Total change detection	79.4 (13.5)	81.3 (12.0)
<hr/>		

* The different rate of presentation for the standard sequences between amusics and controls reflects the matching procedure to maintain *probabilities* of occurrence of deviants equivalent.

FIGURE CAPTIONS

Figure 1. a) Grand average ERP waves obtained for the standard sound and the 25 and 200 cents pitch changes (upward and downward) for the amusic and control subjects at Fz. b) MMN difference waves (deviant minus standard) for the 25 cents and 200 cents pitch changes (upward and downward) for amusics and controls at Fz. c) Individual MMN amplitudes for the 25 and 200 cents pitch differences (upward and downward) for amusics and controls. Dashed lines indicate a downward pitch change, solid lines an upward pitch change and the standard in their respective colors (green for 200 cents; red for 25 cents and black for the standard).

Figure 2. a) Scalp Voltage maps for the 200 pitch difference in MMN; b) for the P3b; c) for the N1 in the ignore condition; d) for the N1 in the attend condition.

Figure 3. Grand average ERP waves obtained in the pitch change detection task in the attend condition for the standard tone as well as the 25 and 200 cents pitch differences (upward and downward) in the amusics and the controls at Cz.

Figure 4. Grand average ERP waves obtained for the first 1080 standard tones in the ignore condition (left panel) and the attend condition (right panel) for the amusics and the controls at Cz.

FIGURES

Figure 1

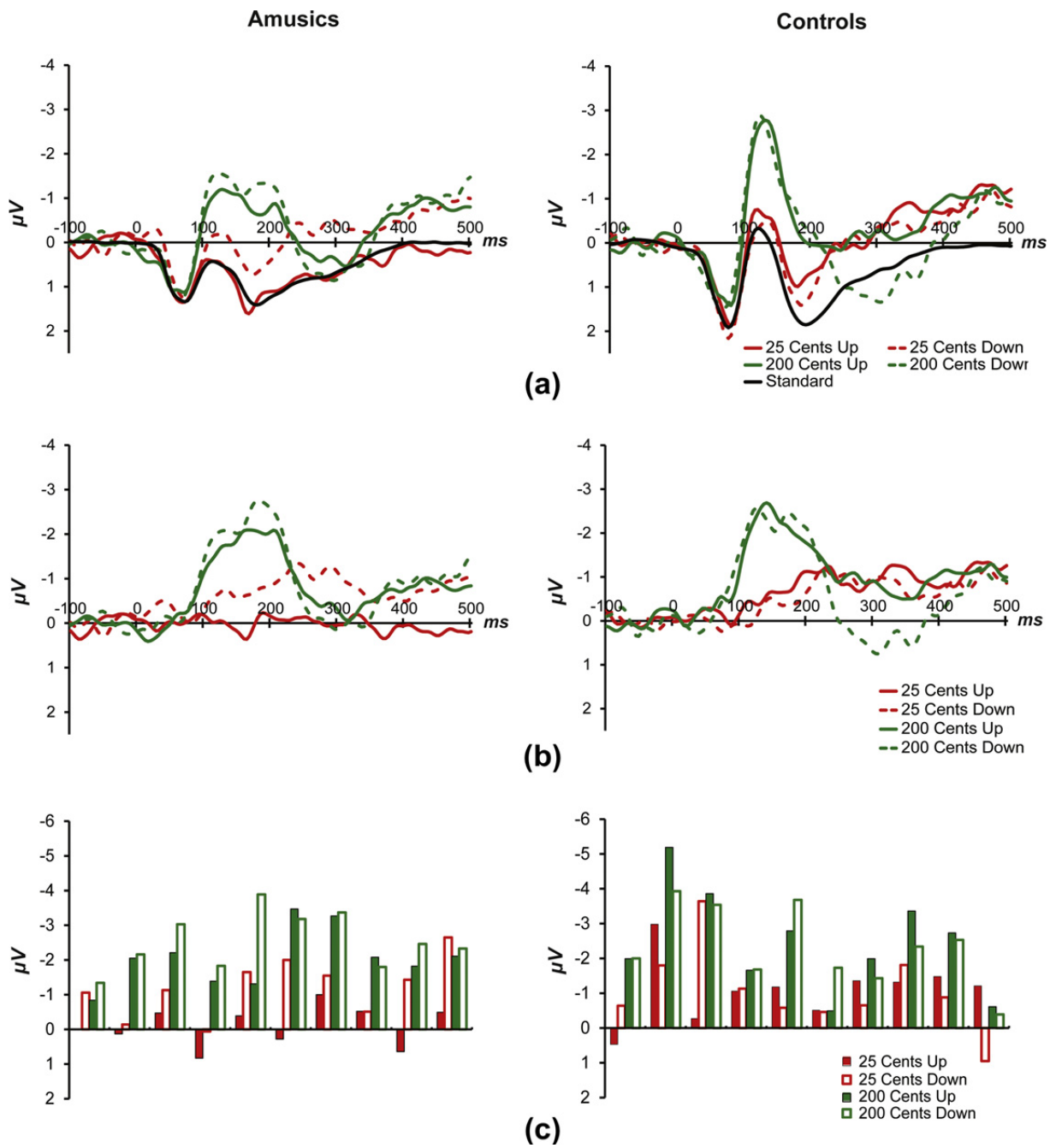


Figure 2

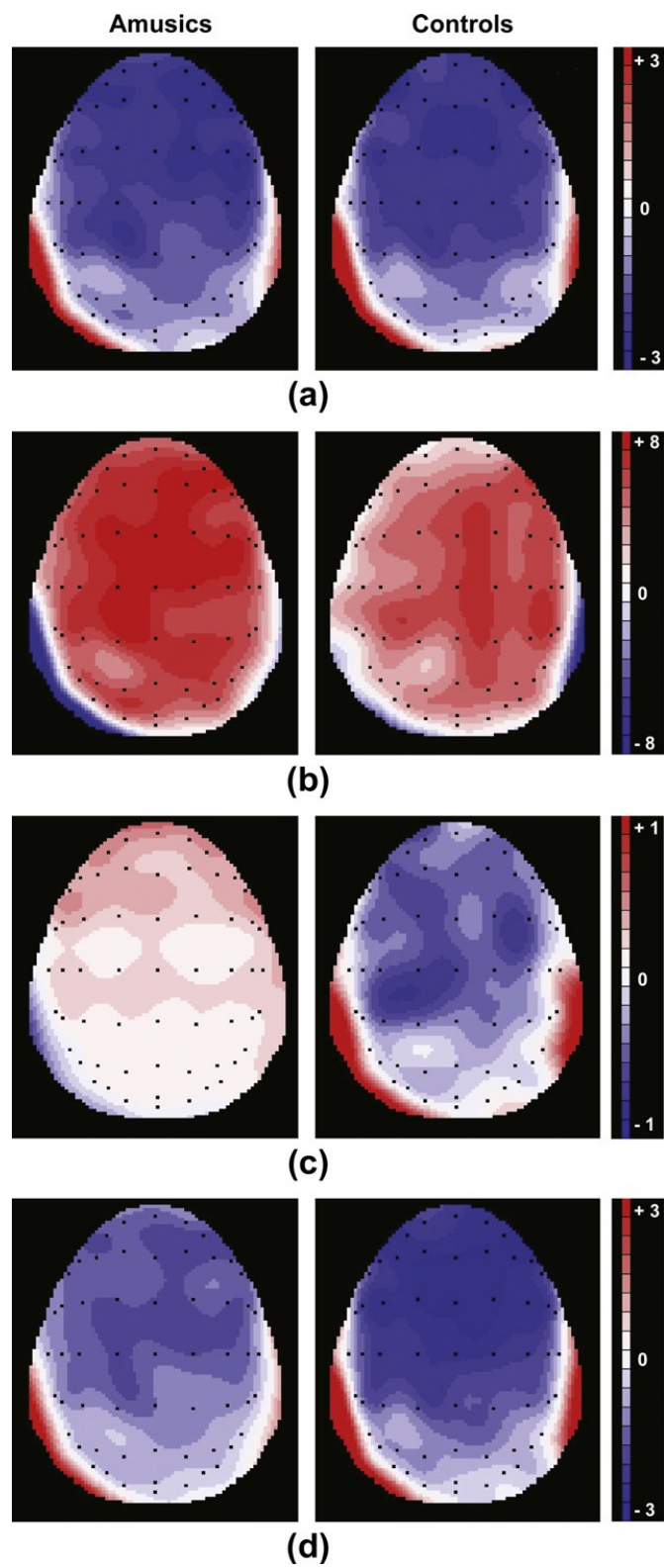


Figure 3

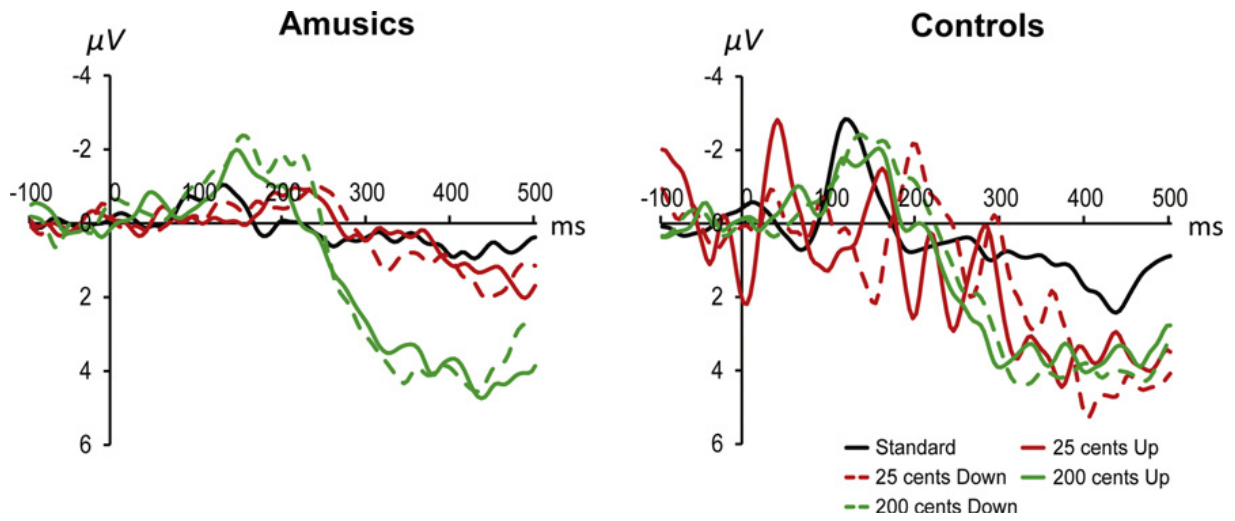
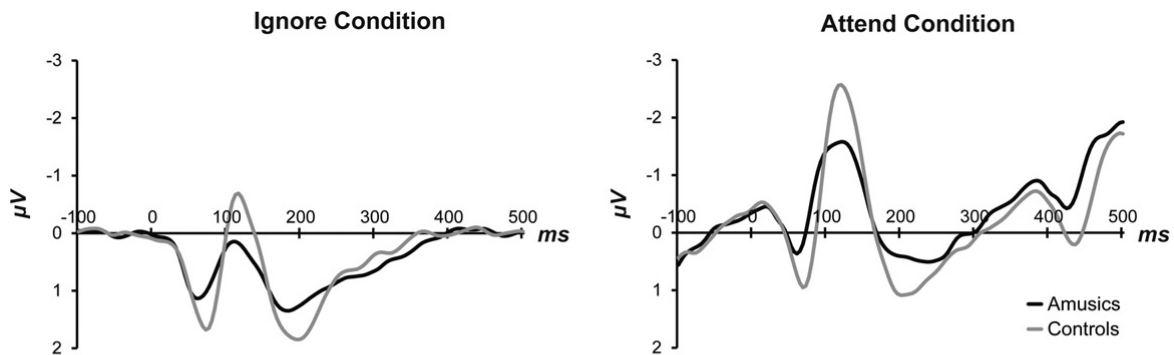
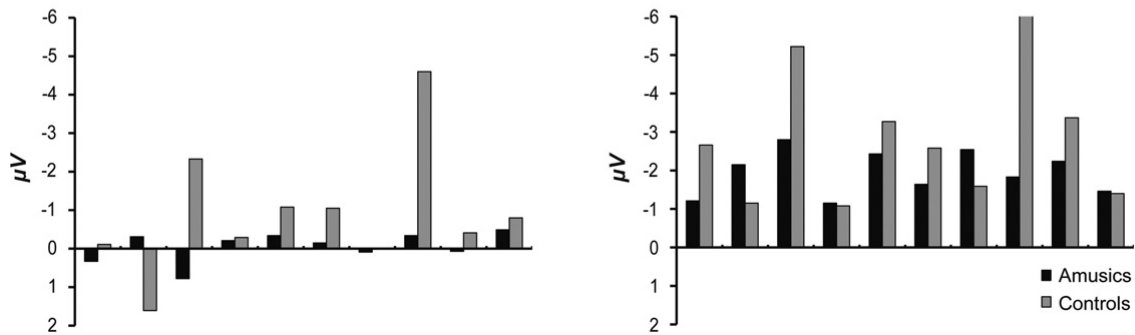


Figure 4



(a)



(b)

4. Discussion générale

L'objectif général de la présente thèse était d'abord d'étudier les effets de la présentation de la trame sonore d'un film pendant l'enregistrement de la MMN, puis d'évaluer les mécanismes précoces et inconscients de discrimination tonale chez les amusiques adultes à l'aide de la MMN. Dans un premier temps, nous avons effectué une étude portant sur les effets de la présentation de la trame sonore d'un film pendant l'enregistrement de la MMN et nos résultats ont permis de démontrer que la trame sonore provoque une réduction d'amplitude de la MMN qui est attribuable à un effet d'interférence acoustique. Dans un second temps, nous avons évalué la MMN dans l'amusie congénitale chez les adultes et nos résultats ont révélé que le cerveau des amusiques répond de manière normale, même pour les petites différences tonales, témoignant ainsi de la capacité des amusiques à détecter de manière précoce et inconsciente de petits changements de hauteur dans la musique. Le déficit de discrimination tonale fine constaté chez les amusiques semble donc relever d'une anomalie de traitement de l'information associée à des processus plus tardifs et dépendants de mécanismes conscients.

Dans la prochaine section, nos résultats seront discutés en lien avec la littérature existante, d'abord en ce qui a trait à la MMN puis à l'amusie congénitale, tout en abordant respectivement leur apport scientifique de même que les limites inhérentes à ces deux études. Des hypothèses de recherches futures seront également proposées afin d'approfondir notre compréhension de ces problématiques.

4.1. La MMN avec la trame sonore d'un film

4.1.1. Les effets de la trame sonore d'un film sur la MMN

Dans un premier temps, nos résultats concernant les effets de la présentation de la trame sonore d'un film sur l'enregistrement de la composante de potentiel évoqué MMN concordent avec la littérature existante. En effet, les seules études ayant directement investigué l'impact de la trame sonore sur la MMN ont démontré une réduction significative de l'amplitude de la MMN comparativement à son enregistrement dans le silence avec un film sous-titré (McArthur et al., 2003; Mahajan & McArthur, 2011). Par ailleurs, nos résultats ont également permis de confirmer que, malgré la diminution d'amplitude observée avec la présentation de la trame sonore d'un film, la MMN enregistrée demeure inchangée en ce qui a trait à ses caractéristiques de base, telles que sa topographie fronto-centrale avec un maximum à Fz, l'inversion du signal aux mastoïdes et une latence comparable à travers les conditions de présentation du film. De manière très intéressante, les changements d'amplitude et de latence de la MMN attendus en fonction des diverses différences de hauteur utilisées se sont également maintenus avec la présentation de la trame sonore. De fait, la littérature a démontré que l'amplitude et la latence de la MMN varient en fonction du niveau de différenciation des déviations sonores par rapport au son standard. En outre, plus la fréquence d'une déviation sonore se rapproche de la fréquence du son standard, plus l'amplitude de la MMN sera réduite et plus sa latence sera tardive (Duncan et al., 2009). Dans le cas présent, la MMN pour la différence sonore de 50 cents (100 cents = $\frac{1}{2}$ ton) est effectivement apparue plus tardive et de moindre amplitude comparativement à la déviation sonore de 300 cents, et ce, tant avec la trame sonore du film que dans la condition avec le film silencieux et sous-titré, témoignant ainsi de l'intégrité du processus générateur de la MMN.

Par ailleurs, nos résultats ont également permis de démontrer que la trame sonore d'un film interfère avec l'ensemble des composantes de potentiel évoqué observées en réponse aux sons déviants et aux sons standards sur les courbes obtenues avant la soustraction qui permet de mesurer la MMN. De fait, les courbes de potentiel évoqué obtenues en réponse à tous les sons sont généralement constituées de la composante P1, associée à des processus d'inhibition, et des composantes N1 et P2, généralement observées en réponse aux caractéristiques physiques de tous les sons (Fonaryova, Dove & Maguire, 2005). Ces composantes sont apparues globalement atténuées dans la condition avec la trame sonore du film comparativement aux courbes obtenues avec le film silencieux et sous-titré, et ce, tant pour les sons déviants que pour les sons standards. En outre, cela suggère que la réduction d'amplitude constatée sur la MMN avec la trame sonore est fort probablement attribuable à une atténuation globale de l'ensemble des composantes de potentiel évoqué observées pour les sons déviants et les sons standards.

Par ailleurs, bien que la MMN apparaisse normale avec la trame sonore d'un film, on pourrait toutefois se questionner quant à la présence contributive d'autres composantes de potentiel évoqué dans le patron de résultats obtenus. De fait, des études ont démontré que la N2b peut survenir dans la même fenêtre temporelle que la MMN en réponse à des changements rares au niveau des propriétés physiques d'un stimulus répétitif et homogène, soit le standard, et qu'elle peut donc se superposer à la MMN en donnant l'impression que cette dernière est de plus grande amplitude. La N2b est toutefois évoquée lorsque le participant doit porter attention à la stimulation auditive (Näätänen, 1991). Dans le cas présent, on aurait donc possiblement pu s'attendre à observer une N2b lorsque la trame sonore du film

est présentée, car l'attention du participant est alors dirigée vers la modalité auditive, soit vers la trame sonore et donc inévitablement vers les sons visant à évoquer la MMN. Nos résultats apparaissent toutefois à l'opposé de l'effet attendu par la présence de la N2b. En effet, l'amplitude de la MMN est plutôt apparue franchement réduite lors de la présentation de la trame sonore du film, ce qui suggère que seule la MMN est véritablement observée. En ce sens, la topographie fronto-centrale avec un maximum à Fz de nos résultats de MMN, de même que l'inversion du signal en mastoïdes, témoignent de signes très caractéristiques de la MMN (Tiitinen et al., 1994) qui permettent de confirmer l'absence de la N2b dans toutes nos conditions.

Ainsi, malgré la réduction d'amplitude constatée, la MMN demeure observable et mesurable avec une topographie inchangée, ce qui explique sans doute pourquoi dans plusieurs études, les chercheurs ont choisi de présenter la trame sonore du film pendant l'enregistrement de la MMN afin de rendre le paradigme expérimental moins ennuyeux et plus adapté à plusieurs populations, telles que les illettrés et les jeunes enfants (ex., Bellis et al., 2000; Bradlow et al., 1999; Hayes et al., 2003; Kraus et al., 1999; McGee et al., 2001; Starratt et al., 2004; Todd et al., 2008; Tremblay et al., 1997). Néanmoins, à l'égard de l'importante réduction d'amplitude constatée avec la présentation de la trame sonore, il convient de se questionner sur la nature exacte de l'effet de la trame sur les mécanismes générateurs de la MMN afin de s'assurer que l'effet d'interférence responsable de la diminution d'amplitude puisse être considéré dans l'interprétation des résultats des études futures qui souhaiteront utiliser ce paradigme.

4.1.2. Un effet attentionnel de la trame sonore?

C'est dans cette optique que la deuxième expérimentation de notre étude sur la MMN a été conduite. Nous avons tenté de déterminer si un effet attentionnel pouvait être à l'origine de la diminution d'amplitude constatée avec la présentation de la trame sonore. Les effets de l'attention sur la MMN ont généré un chaud débat au cours des dernières décennies (pour une revue de la littérature, voir Sussman, 2007). À l'origine, la MMN a été décrite comme relevant d'un processus automatique dont le mécanisme générateur opérerait indépendamment de l'attention (Näätänen, 1990). En outre, la MMN serait évoquée lorsque le participant ne porte pas attention à la stimulation auditive visant à évoquer cette composante. Mais cette affirmation a rapidement été critiquée (Hillyard & Woldorf, 1991), certains chercheurs argumentant que l'attention était susceptible d'interférer avec l'enregistrement de la MMN, ce qui aura généré un important nombre d'études visant à évaluer les effets de l'attention sur la MMN, notamment par l'entremise de paradigmes expérimentaux d'écoute dichotique (Alain & Woods, 1997; Näätänen et al., 1993; Oades & Dittmann-Balcar, 1999; Woldorff et al., 1991) et de manipulations du niveau de difficulté de tâches de distraction (Alho et al., 1992; Dittmann-Balcar et al., 1999; Harmony et al., 2000; Kathmann et al., 1999; Kramer et al., 1995; Muller-Gass et al., 2006; Otten et al., 2000; Yucel et al., 2005; Zhang et al., 2006). Toutefois, les résultats obtenus ont été fréquemment contradictoires, l'amplitude de la MMN étant parfois réduite ou augmentée par les manipulations attentionnelles alors que, dans certains cas, aucun effet de l'attention n'était constaté, ne permettant donc pas d'en arriver à un consensus quant aux effets de l'attention sur la MMN.

Dans ce contexte, il apparait pertinent de se questionner quant au fait que la diminution d'amplitude constatée sur la MMN lors de la présentation de la trame sonore d'un film puisse être attribuable aux effets de l'attention. En effet, la présentation de la trame sonore contribue à diriger l'attention du participant vers la modalité auditive, où sont également présentés les sons visant à évoquer la MMN, alors que dans la condition où l'on présente un film sous-titré, l'attention du participant est au contraire dirigée vers la modalité visuelle, où le film prend tout son sens par l'entremise des sous-titres. Ainsi, il peut être envisageable que l'attention puisse être responsable de la diminution d'amplitude constatée avec la trame sonore d'un film.

Toutefois, les résultats de notre seconde expérimentation ont démontré qu'il était fort peu probable qu'un effet attentionnel soit responsable de la diminution d'amplitude constatée lors de la présentation de la trame sonore d'un film. De fait, nous avons présenté un film sous-titré dont la trame sonore était présentée à l'envers, le principe étant que lorsque la bande sonore est passée à l'envers, toute l'information spectrale et l'enveloppe d'intensité sonore demeurent les mêmes mais le contenu sémantique est retiré. Le participant se voit alors incapable de comprendre le sens de la trame sonore et doit donc rediriger son attention vers la modalité visuelle pour consulter les sous-titres afin de suivre le film. La trame sonore agit alors comme un bruit dénué de sens qui, on peut facilement l'imaginer, contribue à encourager le participant à ignorer l'information transmise dans la modalité auditive, soit la trame sonore inversée et les sons visant à évoquer la MMN. Ainsi, si un effet attentionnel est responsable de la diminution d'amplitude de la MMN constatée lorsque nous présentons la trame sonore d'un film, le fait de rediriger l'attention vers la modalité visuelle en présentant la trame sonore inversée devrait permettre d'observer une MMN d'amplitude normale. Or, nos résultats ont

démontré un effet similaire de la trame sonore inversée comparativement à la trame sonore à l'endroit, avec une diminution d'amplitude de la MMN. Étant donné que l'amplitude de la MMN demeure réduite même lorsque l'attention du participant est redirigée vers la modalité visuelle, il apparaît donc clair que l'enregistrement de la MMN lors de la présentation de la trame sonore d'un film est perturbé par un autre genre d'effet d'interférence que l'attention.

Par ailleurs, nos résultats ont également démontré que la trame sonore inversée semble affecter la MMN légèrement différemment de la trame sonore normale. De fait, l'amplitude de la MMN s'est révélée davantage diminuée avec la trame sonore inversée pour les petites différences comparativement aux grandes différences de hauteur. Cela suggère que la trame sonore inversée interfère davantage avec le processus de discrimination des petites différences tonales que la trame sonore présentée à l'endroit et qu'elle affecte donc de manière plus marquée le mécanisme générateur de la MMN pour les petites différences tonales. En contrepartie, on pourrait aussi argumenter que les petits changements de hauteur sont plus difficilement perceptibles et qu'ils génèrent une MMN de plus petite amplitude dont le signal ERP est généralement plus bruité. Ils sont donc plus susceptibles de générer davantage de variabilité dans les résultats lorsqu'un bruit tel que la trame sonore d'un film vient interférer avec les sons visant à évoquer la MMN. Ainsi, l'effet statistique marginal observé sur l'amplitude de la MMN pour les petites différences de hauteur avec la trame sonore inversée pourrait simplement être attribuable à l'augmentation du bruit dans le signal ERP provoquée par la diminution du niveau de perceptibilité des petites différences sonores par rapport à la trame sonore du film.

Néanmoins, nonobstant la diminution plus marquée de l'amplitude de la MMN pour les petites différences de hauteur avec la trame sonore inversée, la MMN est demeurée globalement diminuée avec la trame sonore. Elle est, malgré tout, apparue tout à fait mesurable et a conservé ses caractéristiques de base en termes de latence et de topographie. Ainsi, en considérant le fait que la trame sonore inversée ait permis de rediriger l'attention des participants vers la modalité visuelle, soit le film sous-titré, et donc à l'écart des sons visant à évoquer la MMN, et que la diminution d'amplitude de la MMN ait tout de même persisté, il est donc apparu clair qu'un facteur autre que l'attention ait interféré avec l'évocation de la MMN.

4.1.3. Un effet d'interférence acoustique

C'est donc dans le but de clarifier la nature de l'effet d'interférence en cause dans la diminution d'amplitude de la MMN, constatée avec la présentation de la trame sonore d'un film, que nous avons conduit une troisième expérimentation. Nos résultats ont alors été les premiers à démontrer que la diminution d'amplitude de la MMN est attribuable à un effet d'interférence acoustique de la trame sonore avec les sons visant à évoquer la MMN. De fait, nous avons constaté que l'amplitude de la MMN s'amplifiait avec l'augmentation de la différence d'intensité sonore des sons visant à évoquer la MMN par rapport à l'intensité de la trame du film (ratio d'intensité). En outre, plus l'intensité sonore des sons visant à évoquer la MMN dominait dans l'information auditive transmise aux participants (combinaison de la trame sonore et des stimuli), plus l'amplitude de la MMN augmentait, sans toutefois qu'elle ne redevienne aussi ample que la MMN observée avec la présentation d'un film silencieux et sous-titré.

Ces résultats sont novateurs en ce qui a trait à notre compréhension des effets en cause lors de la présentation de la trame sonore d'un film, mais ils sont également en accord avec la littérature existante concernant les effets d'interférence acoustique sur la MMN. En effet, plusieurs études ont démontré que l'enregistrement de la MMN peut être perturbé par la présentation de divers types de bruits en simultanée à la stimulation auditive visant à évoquer cette composante de potentiel évoqué. De fait, les résultats de ces études ont tout d'abord permis d'établir que la nature du bruit utilisé semble être critique, les bruits écologiques ayant un impact plus marqué sur l'amplitude de la MMN (Kozou et al., 2005; Levänen & Mikko, 1997), et que la MMN est également davantage réduite lorsque la fréquence (en Hz) du bruit présenté avoisine la fréquence des stimuli (Martin & Stapells, 2005; Martin, Kurtberg & Stapells, 1999). Il s'agit d'un point à considérer lors de la présentation de la trame sonore d'un film pendant l'enregistrement de la MMN. En effet, la trame sonore est constituée d'un amalgame très riche composé de langage, de musique et de nombreux autres sons qui couvrent une grande étendue de fréquences. Il est alors fort probable que la fréquence des sons utilisés afin d'évoquer la MMN se retrouve également dans une forte proportion dans la trame sonore, ce qui risque de générer un effet d'interférence avec l'enregistrement de la MMN. Par ailleurs, il est également possible que la trame sonore interfère avec la MMN d'une autre manière, soit à un niveau purement acoustique. En ce sens, Muller-Gass et al. (2001) ont démontré que le simple fait de présenter un bruit, quel qu'il soit, en simultanée aux sons visant à évoquer la MMN suffisait à diminuer l'amplitude de cette dernière par un effet de masquage acoustique. En outre, plus l'intensité sonore d'un bruit était augmentée, plus les sons critiques à l'évocation de la MMN se confondaient avec le bruit et plus l'amplitude de la MMN était

diminuée. C'est d'ailleurs ce que nos résultats ont démontré avec une augmentation d'amplitude de la MMN lorsque l'intensité sonore de la trame du film était réduite alors que l'intensité des sons visant à évoquer la MMN était augmentée, en accord avec un ratio favorisant la prédominance de ces derniers dans le champ auditif.

En somme, les résultats de cette étude ont été les premiers à déterminer que la présentation de la trame sonore d'un film interfère avec l'enregistrement de la MMN par un effet de masquage acoustique. Malgré la diminution d'amplitude constatée sur la MMN, cette dernière demeure néanmoins tout à fait mesurable et conserve ses caractéristiques de base, ce qui suggère l'intégrité du mécanisme générateur de la composante. Bien que ces résultats n'aient pas permis de clarifier les effets de l'attention sur la MMN, ils ont néanmoins contribué à préciser les facteurs en cause dans la diminution d'amplitude observée sur la MMN avec la trame sonore d'un film, ce qui permettra de mieux adapter les paramètres de ce paradigme expérimental afin de maximiser l'enregistrement de la MMN.

4.1.4. Limites méthodologiques

Quelques limites au plan méthodologique peuvent être soulignées. D'abord, nos expérimentations ne permettent pas avec certitude de manipuler l'attention. En outre, lorsque nous présentons le film sous-titré ou encore la trame sonore du film, qu'elle soit présentée à l'endroit ou qu'elle soit inversée, nous ne pouvons pas être entièrement certains que l'attention des participants est dirigée là où nous l'escomptons. Nous ne pouvons que supposer que les participants ignorent bel et bien les sons visant à évoquer la MMN et qu'ils se concentrent sur

le film, soit sur les sous-titres ou encore sur la trame sonore. Bien que nous ayons pris soin de demander à nos participants à la fin de chaque séance de nous faire part de la manière dont ils ont vécu l'expérience d'enregistrement et ce sur quoi ils se concentraient, il persiste une part d'incertitude quant à ce qui aura réellement mobilisé leur attention.

Dans un deuxième temps, il aurait été préférable de conserver les mêmes participants à travers les trois expérimentations afin de pouvoir comparer les résultats d'un participant par rapport à lui-même, permettant ainsi de bien faire ressortir l'effet unique de la condition expérimentale et non pas un possible effet de groupe. Dans cette étude, nous avons utilisé trois groupes différents de participants pour nos expérimentations et, pour certaines de nos analyses, nous avons dû effectuer des ANOVAs mixtes incluant les comparaisons de groupes, ce qui contribue à diminuer la puissance statistique, surtout lorsque les groupes sont de tailles inégales, tel qu'il en est le cas dans notre étude.

Ensuite, bien que la littérature soit abondante quant aux générateurs neuronaux de la MMN et que nos résultats concernant la topographie de la MMN apparaissent concordants, nous ne pouvons que présumer que les générateurs neuronaux sollicités lors de la présentation de la trame sonore d'un film demeurent les mêmes. Afin de clairement statuer à cet effet, il aurait été préférable d'utiliser la technique de magnétoencéphalographie pour l'enregistrement des données de potentiel évoqué. En effet, la localisation de sources neuronales à partir de données électrophysiologiques n'est pas recommandée, dû au manque de précision engendré par la diffusion du signal à travers les tissus cérébraux et les os du crâne. En revanche, les réponses cérébrales magnétiques traversent aisément la boîte crânienne sans diffusion du

signal, ce qui permet une meilleure résolution spatiale, tout en conservant la grande précision temporelle nécessaire à l'étude des potentiels évoqués.

Enfin, nos résultats ont permis de déterminer qu'un effet d'interférence acoustique était responsable de la diminution d'amplitude constatée sur la MMN lors de la présentation de la trame sonore d'un film, mais n'ont pas permis de préciser si une interférence spécifique au contenu spectral pouvait également être en cause. Pour ce faire, dans notre seconde expérimentation, il aurait été intéressant d'inclure une condition de bruit sonore dont la fréquence serait totalement distincte de la fréquence des sons visant à évoquer la MMN, mais dont l'enveloppe d'intensité sonore serait en tout point comparable à celle de la trame sonore. En outre, ce type de bruit aurait permis de générer une condition représentant uniquement l'effet de masquage acoustique sur la MMN. Ainsi, en comparant la diminution d'amplitude de la MMN observée dans cette condition à la diminution d'amplitude constatée dans la condition avec la trame sonore inversée, on aurait pu réellement déterminer si un effet d'interférence associé au contenu spectral de la trame sonore est également en cause.

4.1.5. Directions futures

L'impact principal de cette étude est une avancée méthodologique quant au paradigme d'évocation de la MMN. De fait, bien que certains chercheurs procèdent déjà à l'enregistrement de la MMN avec la trame sonore d'un film, apparemment avec succès, à l'égard de nos résultats, les laboratoires désirant utiliser ce type de paradigme à l'avenir devraient choisir des ratios d'intensité sonore permettant aux sons critiques de la MMN de

prédominer clairement sur la trame sonore. Ils devraient également demeurer prudents dans l'interprétation de leurs résultats, tout particulièrement pour les petites différences de hauteur qui sont plus susceptibles d'être davantage affectées par la présentation de la trame sonore. Par ailleurs, dans la mesure où la population visée par les études futures ne montre pas de difficultés de lecture et peut être exposée aux sous-titres, le meilleur choix demeure toujours la présentation d'un film silencieux et sous-titré afin d'enregistrer une MMN d'amplitude optimale. En présence de participants illettrés ou présentant des difficultés de lecture, les chercheurs pourraient également envisager la présentation de films muets, dont la compréhension ne requiert pas de dialogues, ou d'autres tâches de diversions telles que jouer à des jeux vidéo. En contrepartie, lorsque les questions de recherches portent sur de grandes différences de hauteur, la trame sonore d'un film pourrait être envisagée, mais son utilisation devrait être effectuée avec prudence lors de la discrimination de petits changements.

Enfin, bien que cette étude n'ait pas permis de contribuer de manière significative au débat concernant les effets de l'attention sur la MMN, il n'en demeure pas moins que la présentation de la trame sonore constitue une voie intéressante afin de moduler le champ de focalisation de l'attention. Les études futures qui désireraient s'intéresser à ce paradigme devraient toutefois déterminer un moyen de mieux contrôler le niveau de mobilisation des participants, afin de s'assurer que l'attention soit dirigée là où elle doit l'être. Le choix des ratios d'intensité sonore devrait être effectué en vue de maximiser l'amplitude de la MMN lors de l'utilisation de la trame sonore, afin qu'un éventuel effet de l'attention puisse être observé au-delà de l'effet d'interférence acoustique généré par la trame sonore.

Ainsi, en considérant le fait que la MMN est affectée de manière significative par la présentation de la trame sonore d'un film, que les petites différences semblent davantage affectées, et que la population clinique des amusiques ciblée par la seconde étude ne présente pas de difficultés associées à la lecture, nous avons convenu de ne pas présenter la trame sonore d'un film pendant l'enregistrement de la MMN. Étant donné que les difficultés rencontrées dans l'amusie congénitale relèvent d'un trouble de discrimination tonale fine, notre priorité était, de favoriser l'enregistrement optimal de la MMN, et ce, même pour les petites différences sonores. Poursuivons donc avec la discussion des résultats de cette seconde étude portant sur la MMN dans l'amusie congénitale.

4.2. L'amusie congénitale

L'objectif principal de cette seconde étude était d'évaluer la MMN chez les personnes souffrant d'amusie congénitale, mais également de revisiter le paradigme expérimental de P3b utilisé précédemment afin de déterminer si certains des effets constatés par Peretz et al. (2005), soit un complexe d'ondes N2b et P3b de plus grande amplitude chez les amusiques en réponse à des grandes différences de hauteur, pouvaient être attribuables à un effet de saillance qu'il serait possible de corriger en ajustant les probabilités d'occurrence des sons entre les amusiques et les contrôles.

4.2.1. La MMN dans l'amusie congénitale

Dans un premier temps, nos résultats sont comparables à certaines des études s'étant intéressées à la MMN dans l'amusie congénitale en démontrant que les amusiques ont une MMN normale, tant pour les petites différences de hauteur que pour les grandes. En effet, dans une étude investiguant les réponses cérébrales des amusiques face à des incongruités mélodiques, Peretz et al. (2009) ont démontré que le cerveau des amusiques semble répondre de manière adéquate à un niveau précoce et inconscient aux différences de hauteur aussi petites qu'un quart de ton, tel que révélé la présence de la MMN, mais aussi d'une N2b normales. Des résultats préliminaires similaires avaient également été constatés par Moreau et al. (2009) dans un contexte de discrimination tonale fine avec une MMN comparable entre les amusiques et les contrôles. Enfin, en parallèle aux travaux de recherches effectués dans le cadre de la présente thèse, les résultats de Mignault Goulet et al. (2012), obtenus auprès d'une population de jeunes enfants amusiques, abondent dans le même sens.

Il importe toutefois de mentionner que certaines études ont obtenu des résultats contradictoires en démontrant une MMN anormale chez les amusiques. En outre, Lebrun et al. (2011) ont constaté l'absence de la MMN chez une jeune enfant amusique. Il s'agit toutefois d'une étude d'un cas unique qui ne permet pas de généraliser à la population des amusiques étant donné la grande variabilité interindividuelle, tout particulièrement en ce qui concerne les potentiels évoqués. Braun et al. (2009) ont également démontré un patron de résultats fort surprenant et caractérisé par l'absence de la MMN chez les amusiques et la présence d'une P3b normale en réponse à une tâche de discrimination des hauteurs. Toutefois, cette étude comporte plusieurs lacunes méthodologiques, dont la principale concerne le fait qu'aucune

mesure comportementale n'a été effectuée et qu'il est donc impossible de confirmer que les résultats rapportés sont représentatifs d'un réel trouble de discrimination des hauteurs.

En somme, les résultats de la présente étude, en accord avec les recherches antérieures, confirment l'intégrité des mécanismes de discrimination des hauteurs précoces et préconscients chez les amusiques par la présence d'une MMN normale. En ce sens, la topographie de la MMN, avec l'inversion du signal aux mastoïdes, sa latence et son amplitude, tous comparables entre les amusiques et les contrôles, témoignent du fait que les mécanismes générateurs de la MMN opèrent de manière adéquate chez les amusiques.

4.2.2. La P3b chez les amusiques

Nos recherches ne se sont toutefois pas limitées à l'exploration des mécanismes précoces et préconscients de traitement des sons. En effet, nous avons également revisité le paradigme expérimental utilisé précédemment par Peretz et al. (2005) afin d'investiguer la P3b chez les amusiques. Les résultats de cette étude avaient démontré l'absence de la P3b chez les amusiques pour les petites différences de hauteur et la présence inattendue de la N2b de même qu'une P3b de plus grande amplitude uniquement chez les amusiques en réponses aux grandes différences de hauteur. Notre objectif était de démontrer que ce dernier résultat, concernant le complexe d'ondes anormales N2b et P3b observé chez les amusiques, était en fait attribuable à un effet de saillance des grandes différences de hauteur. En outre, en considérant que les amusiques ne perçoivent pas les petites différences de hauteur, on peut émettre l'hypothèse que ces dernières sont alors traitées comme des sons standards. Ceci ferait significativement augmenter le nombre de sons standards perçus et contribuerait à diminuer la

probabilité d'occurrence des grandes différences de hauteur, qui sont alors beaucoup plus rares. La P3b et la N2b étant toutes deux des composantes de potentiel évoqué dont l'amplitude augmente au fur et à mesure que la probabilité d'occurrence des déviations sonores diminue (Donchin, 1981; Donchin, Miller & Farwell, 1986; Näätänen & Picton, 1986), cela pourrait expliquer pourquoi les amusiques obtiennent un complexe d'ondes N2b-P3b plus ample pour les grandes différences de hauteur. C'est ce que nous avons tenté de mieux contrôler en ajustant les probabilités d'occurrence des sons présentés aux contrôles en fonction des sons perçus par les amusiques qui leur étaient appariés.

Dans un premier temps, bien que nous ayons ajusté les probabilités d'occurrence des sons standards et des déviations sonores entre les amusiques et les contrôles, nos résultats comportementaux témoignent toujours du même déficit de discrimination tonale fine observé exclusivement chez les amusiques, tel que rapporté par Peretz et al. (2005). Pour leur part, les résultats de potentiel évoqué sont également apparus comparables à ceux obtenus par Peretz et al. (2005) pour les petites différences de hauteur, en démontrant l'absence de la P3b chez les amusiques. En revanche, suite à l'ajustement des probabilités d'occurrence, nous avons constaté un profil similaire entre les amusiques et les contrôles pour la P3b pour les grandes différences de hauteur, la N2b n'étant dorénavant plus observable chez les deux groupes. Ces résultats confirment donc que le complexe d'ondes anormales N2b-P3b observé par Peretz et al. (2005) n'était attribuable qu'à un effet de saillance des grandes différences de hauteur. La présente étude permet donc de confirmer que le déficit de discrimination tonale en cause dans l'amusie congénitale peut être retracé dans des réponses cérébrales anormales qui sont

exclusivement associées à un trouble de discrimination tonale fine, les réponses pour les grandes différences de hauteur étant normales.

4.2.3. Les corrélats neuronaux de l'amusie congénitale

Les résultats de la présente étude ont apporté une contribution significative à notre compréhension des mécanismes cérébraux en cause dans l'amusie congénitale. Tout d'abord, le fait que les amusiques démontrent une MMN normale permet de faire certaines inférences, bien que limitées, quant à l'intégrité du cortex auditif des amusiques. En effet, en considérant le fait que les populations neuronales responsables du processus d'évocation de la MMN ont été identifiées dans les aires frontales et dans le cortex auditif (Näätänen & Alho, 1995; Deouell, 2007), il serait alors envisageable d'émettre l'hypothèse que le cortex auditif, de même que le cortex frontal des amusiques, semblent préservés. Dans le même ordre d'idée, Peretz et al. (2009) avaient également observé une réponse N2b normale chez les amusiques, cette dernière étant associée à l'activité neuronale dans le cortex auditif supra temporal (ex., Bruneau & Gomot, 1998).

Toutefois, les récents résultats d'Albouy et al. (2013) démontrent qu'il serait hâtif de statuer sur l'intégrité de cortex auditif sur la base d'une MMN et d'une N2b normales. De fait, Albouy et al. ont observé une N1 anormale en réponse à divers stimuli musicaux chez les amusiques. Les générateurs neuronaux bien connus de la N1 ont été identifiés dans le cortex auditif (ex : Scherg et al., 1989), ce qui indique qu'un dysfonctionnement des populations neuronales génératrices de la N1 semble être présent chez les amusiques. En ce sens, les analyses de la N1 effectuées dans le cadre de la présente étude n'ont pas permis de démontrer

statistiquement que la N1 différait significativement entre les amusiques et les contrôles, mais l'analyse visuelle des courbes de potentiel évoqué, obtenues pour les sons standards, a permis d'identifier une N1 légèrement moins ample chez les amusiques, ce qui tend à confirmer les résultats obtenus par Albouy et al. Par ailleurs, il est fort possible qu'avec des paramètres expérimentaux mieux adaptés à l'évocation de la N1, comme un intervalle inter-stimulus plus long, nous aurions pu observer une différence significative entre la N1 des amusiques et celle des contrôles, signant ainsi une atteinte des processus précoces d'analyse des caractéristiques physiques des sons et donc, une anomalie au niveau du fonctionnement du cortex auditif.

Par ailleurs, nos résultats ont également confirmé la présence d'une P3b anormale chez les amusiques en réponses aux petites différences de hauteur. Les générateurs neuronaux de la P3b sont toutefois généralement reconnus pour être répandus dans le cerveau, notamment au niveau du cortex pariétal et cingulaire, de même que dans le cortex préfrontal (ex., Linden, 2005), ce qui ne permet pas d'émettre d'hypothèses précises quant aux atteintes neuronales retrouvées chez les amusiques. En ce sens, les résultats de Peretz et al. (2009) avaient également démontré des anomalies de la P600 chez les amusiques, qui représente également des processus de traitement de l'information plus tardifs et conscients. Ils n'avaient cependant pas non plus permis de clarifier le locus neuronal de cette anomalie, les générateurs neuronaux de la P600 étant eux aussi nombreux et retrouvés dans les aires préfrontales et le cortex temporal antérieur (Guillem, N'Kaoua, Rougier & Claverie, 1995) de même que le cortex cingulaire antérieur (Guillem, Rougier & Claverie, 1999).

Somme toute, à ce jour, les résultats des études ERP chez les amusiques révèlent la présence d'anomalies au niveau du traitement des propriétés physiques des sons, qui est associé à la N1 et donc au cortex auditif, de même qu'au niveau des processus tardifs et conscients de discrimination tonale fine, associés notamment aux aires corticales préfrontales. Ces résultats apparaissent concordants avec la littérature existante en imagerie cérébrale qui fait état d'anomalies anatomiques retrouvées dans les aires corticales frontales, plus spécifiquement dans le gyrus inférieur frontal droit, de même que dans le cortex auditif droit des amusiques (Hyde et al., 2006; Hyde et al., 2007). Nos données abondent également dans la même direction que les défaillances de connectivité constatées dans l'amusie congénitale entre ces mêmes aires cérébrales (Hyde et al., 2011) de même qu'au niveau du faisceau arqué droit qui relie le cortex auditif aux lobes frontaux (Loui et al., 2009).

4.2.4. Percevoir sans en avoir conscience

Par ailleurs, au-delà de la contribution à notre compréhension des mécanismes neuronaux sous-jacents à l'amusie congénitale, les résultats de cette étude contribuent également à approfondir nos connaissances en ce qui a trait au phénomène de la perception préconsciente. En effet, de nombreuses études ont démontré qu'il est possible de percevoir des choses de manière implicite, c'est-à-dire que le cerveau répond à des stimuli que le participant ne rapporte pas avoir consciemment perçus. Ce type de phénomène a été étudié de manière exhaustive dans la sphère visuelle, mais l'étendue des recherches effectuées dans la modalité auditive est beaucoup plus limitée (pour un revue voir : Kouider & Dehaene, 2007). En outre, les résultats de la présente étude sont particulièrement intéressants puisqu'ils démontrent que les amusiques ne perçoivent pas consciemment les petites différences de hauteur, tant au

niveau comportemental qu'au niveau de leurs réponses cérébrales tardives, tel que révélé par l'absence de la P3b. Leur cerveau parvient pourtant à les détecter tout à fait normalement à un niveau précoce et préconscient de traitement de l'information, tel que révélé par la présence d'une MMN normale. Cela constitue un exemple de perception implicite qui est exclusivement limité à la perception des petites différences de hauteur, les grandes différences étant au contraire très bien perçues à tous les niveaux. Bien que l'exploration de ce type de phénomène n'ait pas fait l'objet principal de cette recherche, les résultats suggèrent que l'amusie pourrait permettre d'explorer de nouvelles avenues dans le champ d'étude de la perception implicite.

4.2.5. Limites méthodologiques

Quelques limites méthodologiques peuvent être soulignées en ce qui concerne cette étude. Dans un premier temps, bien que notre paradigme d'ajustement des probabilités ait permis de bien répondre à notre questionnement concernant le complexe d'ondes N2b-P3b anormal observé par Peretz et al., (2005), nous avons été confronté à un haut niveau de bruit dans les données ERP qui a été engendré par le trop petit nombre de sons présentés. En outre, lorsque nous avons ajusté le nombre de sons présentés aux contrôles en fonction du nombre de sons perçus par les amusiques, nous nous sommes retrouvés avec un très petit nombre de sons, tout particulièrement pour la différence de hauteur de 25 cents chez les contrôles. Afin de stabiliser les données, il aurait fallu augmenter le nombre de sons initialement présentés aux deux groupes.

Dans le même ordre d'idée, il aurait également été bénéfique pour la stabilité des résultats de recruter davantage de participants dans les deux groupes. De fait, l'augmentation du N joue un rôle important en réduisant l'impact de la variabilité dans les calculs statistiques. Toutefois, il s'agit d'une limite inhérente à toutes les études conduites à ce jour auprès de la population des amusiques et qu'il est difficile de pallier car il est relativement ardu de recruter de nouveaux amusiques et de s'assurer leur collaboration sur une assez longue période pour nous permettre d'effectuer les tests nécessaires à l'étude et à la compréhension de leur profil idiopathique.

Dans un troisième temps, il aurait également été intéressant de contrebalancer l'ordre de présentation des tâches expérimentales, la tâche visant à évoquer la MMN étant toujours présentée en premier et étant suivie de la tâche visant à évoquer la P3b. En outre, le paradigme choisi dans cette étude ne nous permet pas d'évaluer si un effet d'ordre de présentation interfère avec les résultats. En effet, les stimuli étant les mêmes dans les deux tâches, il est possible qu'un effet de fatigue neuronale ou de fatigue cognitive soit intervenu, les participants étant possiblement moins disponibles dans la deuxième partie de l'expérimentation. Toutefois, il est important de mentionner qu'en présentant la tâche visant à évoquer la P3b en premier, l'attention des participants aurait alors été directement dirigée vers les stimuli, ce qui aurait pu nuire à leur capacité à ignorer ces mêmes sons lors de la tâche visant à évoquer la MMN et donc possiblement contaminer les résultats. C'est pour cette raison que nous avons choisi de ne pas contrebalancer l'ordre de présentation des tâches.

4.2.6. Directions futures

À ce jour, nos connaissances quant aux corrélats neuronaux de l'amusie congénitale sont principalement axées sur des niveaux de traitement de l'information associés au néocortex. Toutefois, en considérant l'étendue des réseaux de fibres neuronales, qui permettent une interaction entre les diverses zones du cerveau, il apparaît clair que le fonctionnement cérébral associé aux processus de discrimination tonale relève d'une dynamique complexe où les divers niveaux traitement interagissent et s'influencent entre eux. Les études récentes nous ont même démontré que le fonctionnement de haut niveau associé aux processus corticaux peut avoir une influence, par l'entremise de réseaux de fibres descendantes, sur des mécanismes très précoces associés à l'activité de population neuronales retrouvées à l'extérieur du cortex dans le tronc cérébral. Le tronc cérébral est une zone sous-corticale considérée comme la porte d'entrée dans le processus de traitement des sons et dont l'activité peut être enregistrée de manière très précise par l'entremise de la technique d'électrophysiologie. Ce qui caractérise tout particulièrement l'activité du tronc cérébral est la fidélité avec laquelle la fréquence fondamentale (f_0) et les harmoniques des sons sont représentées dans les réponses électrophysiologiques. Des études ont même démontré que les réponses neuronales du tronc cérébral se synchronisent avec une précision étonnante aux variations de fréquences retrouvées au sein de divers stimuli, ce qu'on appelle la réponse d'adoption de fréquence (en anglais : *frequency following response* ou FFR; Greenberg, Marsh, Brown & Smith, 1987). Wong, Skoe, Russo, Dees & Kraus, (2007) ont d'ailleurs démontré que les FFRs du tronc cérébral de musiciens suivaient de manière plus précise les fluctuations de fréquence retrouvées au sein d'un son de nature linguistique comparativement aux non-musiciens. Ces résultats indiquent donc que la spécialisation du néocortex pour les

stimuli musicaux chez les musiciens peut avoir un impact sur les mécanismes très précoces d'analyse neuronale associés au tronc cérébral. Il est suggéré que des réseaux de fibres neuronales descendantes permettraient à l'information liée aux activations corticales, dites de haut niveau, d'influencer les réponses primaires et très précoces.

En ce sens, on pourrait imaginer que le cas inverse puisse être observé chez les amusiques. De fait, ces derniers présentent des anomalies corticales et des dysfonctionnements au niveau des processus de traitement de l'information. Ceux-ci pourraient également avoir une influence sur la précision des réponses du tronc cérébral par l'entremise de réseaux de fibres descendantes. L'étude des réponses FFRs du tronc cérébral chez les amusiques constitue donc une avenue intéressante dans le but de parfaire notre compréhension de l'étendue des corrélats neuronaux de l'amusie congénitale.

Par ailleurs, l'approfondissement de nos connaissances en ce qui a trait au déficit sous-jacent à l'amusie congénitale et ses corrélats neuronaux ouvre également la voie à des possibilités de réadaptation. De fait, l'essentiel des études s'étant intéressées à l'amusie à ce jour se sont concentrées sur les mécanismes responsables de l'expression de ce trouble, de même que sur les anomalies neuronales y étant associées, mais très peu d'approches de remédiation ont été proposées. En ce sens, une récente étude de Mignault Goulet et al. (2012) a été une des premières à évaluer les effets d'une exposition musicale quotidienne chez un groupe de pré-adolescents amusiques. Les résultats se sont toutefois révélés peu concluants, les caractéristiques comportementales et électrophysiologiques de l'amusie congénitale étant demeurées stable et inchangée après un mois d'exposition intensive à du contenu musical. Il

apparaît donc que la simple exposition musicale ne suffit pas à compenser les lacunes constatées chez les amusiques. Dans les recherches futures, à l'instar de ce qui est fait dans le champ parallèle du langage (par exemple, pour l'entraînement à la lecture dans la dyslexie), les programmes de réadaptation devraient se concentrer sur des approches de remédiation cognitive plus ciblées sur l'entraînement à la discrimination tonale fine, qui constitue le déficit sous-jacent à l'amusie congénitale. La comparaison des mesures comportementales prises avant et après l'intervention, de même que l'investigation des altérations au niveau des réponses cérébrales suite au programme de réadaptation, permettraient alors d'évaluer l'efficacité de la remédiation cognitive et de confirmer le potentiel de récupération des capacités de discrimination tonale fine de même que de la plasticité cérébrale chez les amusiques. Il s'agit là d'une avenue fort prometteuse qui contribuerait encore à approfondir notre compréhension de l'amusie congénitale.

5. Conclusion

L'amusie congénitale est un trouble développemental caractérisé par de la difficulté à produire et à apprécier la musique. Le déficit sous-jacent à cette condition particulière est bien connu et est caractérisé par une incapacité à discriminer les différences de hauteur inférieures à un demi-ton. À ce jour, plusieurs études ont permis de démontrer l'origine organique de ce déficit en corrélant les difficultés de discrimination tonale fine observées chez les amusiques à des réponses cérébrales anormales de même qu'à des anomalies anatomiques au niveau de la matière grise et de la matière blanche. Il a également été établi que les processus neuronaux conscients et de haut niveau de discrimination des sons sont affectés chez les amusiques. Toutefois, les mécanismes plus précoces et préconscients n'avaient que très peu été explorés directement jusqu'à maintenant. Pour ce faire, la MMN est une composante de potentiel évoqué de choix, puisqu'elle est associée aux processus de détection de changements survenant très tôt dans la chaîne d'activation neuronale impliquée dans la discrimination tonale et s'opérant de manière automatique avant même que le participant en ait conscience.

La MMN est particulièrement intéressante puisqu'elle peut être évoquée même si le participant ne porte pas attention à la stimulation sonore présentée. De fait, dans certaines études, la MMN a été enregistrée pendant qu'on présentait un film avec la trame sonore, mais cela a eu un impact significatif sur l'amplitude de la composante qui se voyait réduite. Toutefois, à ce jour, la nature exacte de l'effet responsable d'une telle réduction d'amplitude n'avait encore jamais été investiguée.

En ce sens, nos résultats ont démontré que la réduction d'amplitude observée lors de l'enregistrement de la MMN avec la trame sonore d'un film est attribuable à un effet de

masquage acoustique de la trame sonore qui agit comme un bruit interférant avec la perception des sons visant à évoquer la MMN. Il est également apparu que cet effet était plus marqué pour les petites différences de hauteur. Sur base de ces résultats, il apparaissait peu judicieux d'avoir recours à ce paradigme chez les amusiques étant donné que le déficit sous-jacent à l'amusie relève d'un problème de discrimination tonale fine. C'est pourquoi la MMN a été étudiée chez les amusiques dans un paradigme plus classique n'ayant pas recours à la présentation de la trame sonore d'un film.

Nos résultats électrophysiologiques de MMN chez les amusiques ont donc permis de démontrer que le cerveau des amusiques détecte efficacement les petites différences de hauteur à un niveau précoce et préconscient de discrimination tonale. Par ailleurs, nos résultats ont également contribué à confirmer que le déficit de discrimination tonale fine observé dans l'amusie congénitale relève d'une anomalie associée aux mécanismes plus tardifs et conscients de détection de changements de hauteur, tel que révélé par une P3b anormale en réponse aux petites différences de hauteur.

Pour conclure, le présent projet de recherche a contribué à l'avancement de la discipline par une avancée méthodologique, en démontrant que la MMN peut être enregistrée avec la présentation de la trame sonore d'un film, mais que les chercheurs devraient demeurer prudents dans le choix d'un tel paradigme, en considérant l'effet d'interférence acoustique qui agit significativement sur l'amplitude de la MMN. Enfin, nos résultats sont également novateurs puisqu'ils contribuent à approfondir notre compréhension de la dynamique complexe du traitement des hauteurs chez les amusiques, en démontrant que l'amusie

constitue un cas singulier de perception implicite, les mécanismes préconscients de discrimination tonale fine étant préservés, alors que le traitement de la même information apparaît déficitaire à un niveau plus tardif, nécessitant la détection consciente des petits changements de hauteur.

6. Références

- Alain, C., & Woods, D.L. (1997). Attention modulates auditor pattern memory as indexed by event-related brain potentials. Psychophysiology, *34*, 534-546.
- Albouy, P., Mattout, J., Bouet, R., Maby, E., Sanchez, G., Aguera, P.E., Daligault, S., Delpuech, C., Bertrand, O., Caclin, A., & Tillmann, B. (2013). Impaired pitch perception and memory in congenital amusia: the deficit starts in the auditory cortex. Brain, *136*, 1639-1661.
- Alho, K., Woods, D.L., Algazi, A., & Näätänen, R. (1992). Intermodal selective attention. II. Effects of attentional on processing of auditory and visual stimuli in central space. Electroencephalogr Clin Neurophysiol, *82*, 356-368.
- Allen, G. (1878). Note-deafness. Mind, *10*, 157-167.
- Ayotte, J., Peretz, I., & Hyde, K. (2002). Congenital amusia. A group study of adultes afflicted with a music-specific disorder. Brain, *125*, 238-251.
- Bellis, T.J., Nicol, T., & Kraus, N. (2000). Ageing affects hemispheric asymmetry in the neural representation of speech sounds. J Neurosci, *20*, 791-797.
- Besson, M. & Faïta, F. (1995). An event-related potential (ERP) study of musical expectancy: Comparison of musicians with nonmusicians. J Exp Psychol Hum Percept Perform, *21*, 1278-1296.
- Bradlow, A.R., Kraus, N., Nicol, T.G., Cunningham, J., Zecker, S.G., & Carrell, T.D. (1999). Effects of lengthened formant transition duration on discrimination and neural representation of synthetic CV syllables by normal and learning-disabled children. J Acoust So Am, *106*, 2086-2096.

- Braun, A., McArdle, J., Jones, J., Nechaev, V., Zalewski, C., Brewer, C., & Drayna, D. (2008). Tune deafness: Processing melodic errors outside of conscious awareness as reflected by components of the auditory ERP. PLoS ONE, *3*, e2349.
- Bruneau, N., & Gomot, M. (1998). *Auditory evoked potentials (N1 wave) as indices of cortical development*. In B. Garreau (Ed.), *Neuroimaging in child neuropsychiatric disorders*. Springer, Berlin, pp. 113–124.
- Deouell, L.Y. (2007). The frontal generator of the mismatch negativity revisited. J Psychophysiol, *21*, 188-203.
- Dittmann-Balcar, A., Thienel, R., & Schall, U. (1999). Attention-dependent allocation of auditory processing resources as measured by mismatch negativity. Neuroreport, *10*, 3749-3753.
- Donchin, E. (1981). Presidential address, 1980. Surprise!...Surprise? Psychophysiology, *18*, 493-513.
- Donchin, R., & Coles, M. (1988). Is the P300 component a manifestation of context updating? Behav Brain Sci, *11*, 357-427.
- Donchin, E., Miller, G. A., & Farwell, L. A. (1986). The endogenous components of the event-related potential--a diagnostic tool? Prog Brain Res, *70*, 87-102.
- Drake, C. (1998). Psychological processes involved in the temporal organization of complex auditory sequences : Universal and acquired processes. Music Percept, *16*, 11-26.
- Duncan, C.C., Barry, R.J., Connolly, J.F., Fisher, C., Michie, P.T., Näätänen, R., Polich, J., Reinvang, I., & Van Petten, C. (2009). Event-related potentials in clinical research: Guidelines for eliciting, recording, and quantifying mismatch negativity, P300, and N400. Clin Neurophysiol, *120*, 1883-1908.

- Folstein, J.R., & Van Petten, C. (2008). Influence of cognitive control and mismatch on the N2 Component of the ERP: A review. Psychophysiology, *45*, 152-170.
- Fonaryova, A.P., Dove, G.O., & Maguire, M.J. (2005). Linking brain waves to the brain : An ERP primer. Dev neuropsychol, *27*, 183-215.
- Fry, D.B. (1948). An experimental study of tone deafness. Speech, 1-7.
- Greenberg, S., Marsh, J.T., Brown, W.S., & Smith, J.C. (1987). Neural temporal coding of low pitch: Human frequency following responses to complex tones. Hearing Res, *25*, 91-114.
- Guillem, F., N’Kaoua, B., Rougier, A., & Claverie, B. (1995). Intracranial topography of event-related potentials (N400/P600) elicited during a continuous recognition memory task. Psychophysiology, *32*, 382-392.
- Guillem, F., Rougier, A., & Claverie, B. (1999). Short- and long-delay intracranial ERP effects dissociate memory systems in the human brain. J Cognitive Neurosci, *11*, 437-458.
- Haig, A.R., Gordon, E., & Hook, S. (1997). To scale or not to scale: McCarthy and Wood revisited. Electroencephalogr Clin Neurophysiol, *103*, 323–325.
- Harmony, T., Bernal, J., Fernández, T., Silva-Pereyra, J., Fernández-Bouzas, A., Marosi, E., et al. (2000). Primary task demands modulate P3a amplitude. Cogn Brain Res, *9*, 53-60.
- Hayes, E.A., Warrier, C.M., Nicol, T.G., Zecker, S.G., & Kraus, N. (2003). Neural plasticity following auditory training in children with learning problems. Clin Neurophysiol, *114*, 673-684.

- Hyde, K. L., Lerch, J. P., Zatorre, R. J., Griffiths, T. D., Evans, A. C., & Peretz, I. (2007). Cortical thickness in congenital amusia: when less is better than more. J Neurosci, 27, 13028-13032.
- Hyde, K. L., & Peretz, I. (2004). Brains that are out of tune but in time. Psychol Sci, 15, 356-360.
- Hyde, K. L., Zatorre, R. J., Griffiths, T. D., Lerch, J. P., & Peretz, I. (2006). Morphometry of the amusic brain: a two-site study. Brain, 129, 2562-2570.
- Hyde, K. L., Zatorre, R. J., & Peretz, I. (2011). Functional MRI evidence of an abnormal neural network for pitch processing in congenital amusia. Cereb Cortex, 21, 292-299.
- Kalmus, H., & Fry, D.B. (1980). On tune deafness (dysmelodia) : Frequency, development, genetics and musical background. Ann Hum Genet, 43, 369-382.
- Kathmann, N., Frodl-Bauch, R., & Hegerl, U. (1999). Stability of the mismatch negativity under different stimulus and attention conditions. Clin Neurophysiol, 110, 317-323.
- Koelsch, S., Gunter T.C., Cramon, D.Y., Zysset, S., Lohmann, G., & Friederici, A.D. (2002). Bach speaks: a cortical language network serves the processing of music. Neuroimage, 17, 956-966.
- Kouider, S., & Dehaene, S. (2007). Levels of processing during non-conscious perception: a critical review of visual masking. Phil Trans R Soc B, 362, 857-875.
- Kozou, H., Kujala, T., Shtyrov, Y., Toppila, E., Starck, J., Alku, P, et al. (2005). The effect of different noise types on the speech and non-speech elicited mismatch negativity. Hearing Res, 199, 31-39.

- Kramer, A.F., Treho, L.J., & Humphrey, D. (1995). Assessment of mental workload with task-irrelevant auditory probes. Biol Psychol, *40*, 83-100.
- Kraus, N., Koch, D.B., McGee, T.J., Nicol, T.G., & Cunningham, J. (1999). Speech-sound discrimination in school-age children: Psychophysical and neurophysiologic measures. J Speech Lang Hear Res, *42*, 1042-1060.
- Kujala, T., & Näätänen, R. (2001). The mismatch negativity in evaluating central auditory dysfunction in dyslexia. Neurosci Biobehav R, *25*, 535-543.
- Kujala, T., Tervaniemi, M., & Schröger, E. (2007). The mismatch negativity in cognitive and clinical neuroscience: Theoretical and methodological considerations. Biol Psychol, *74*, 1-19.
- Lebrun, M.A., Moreau, P., McNally-Gagnon, A., Mignaul Goulet, G., & Peretz, I. (2011). Congenital amusia in childhood : A case study. Cortex, *48*, 683-688.
- Levänen, S., & Mikko, S. (1997). Disrupting human auditory change detection: Chopin is superior to white noise. Psychophysiology, *34*, 258-265.
- Linden, D. E. (2005). The p300: where in the brain is it produced and what does it tell us? Neuroscientist, *11*, 563-576.
- Loui, P., Alsop, D., & Schlaug, G. (2009). Tone deafness: a new disconnection syndrome? J Neurosci, *29*, 10215-10220.
- Loui, P., Guenther, F. H., Mathys, C., & Schlaug, G. (2008). Action-perception mismatch in tone-deafness. Curr Biol, *18*, R331-332.
- Maess, B., Koelsch, S., Gunter, T.C., & Friederici, A.D. (2001). Musical syntax is processed in Broca's area : An MEG study. Nat Neurosci, *4*, 540-545.

- Mahajan, Y., & McArthur, G. (2011). The effect of a movie soundtrack on auditory event-related potentials in children, adolescents, and adults. Clin Neurophysiol, *122*, 934-941.
- Martin, B.A., Kurtzberg, D., & Stapells, D.R. (1999). Masking on N1 and the mismatch negativity to speech sounds /ba/ and /da/. J Speech Lang Hear Res, *42*, 271-286.
- Martin, B.A., & Stapells, D.R. (2005). Effects of low-pass noise masking on auditory event-related potentials to speech. Ear Hear, *26*, 195-213.
- May, P.J.C., & Tiitinen, H. (2010). Mismatch negativity (MMN), the deviance-elicited auditory deflection, explained. Psychophysiology, *47*, 66-112.
- McArthur, G.M., Bishop, D.V.M., & Proudfoot, M. (2003). Do video sounds interfere with auditory event-related potentials? Behav Res Methods Instrum Comput, *35*, 329-333.
- McCarthy, G., & Wood, C.C. (1985). Scalp distributions of event-related potentials: an ambiguity associated with analysis of variance models. Electroencephalogr Clin Neurophysiol, *62*, 203-208.
- McGee, T.J., King, C., Tremblay, K., Nicol, T.G., Cunningham, & J., Kraus, N. (2001). Long-term habituation of speech-elicited mismatch negativity. Psychophysiology, *38*, 653-658.
- Mignault Goulet, G., Moreau, P., Robitaille, N., & Peretz, I. (2012). Congenital Amusia Persists in the Developing Brain after Daily Music Listening. PLoS ONE, *7*, e36860.
- Moreau, P., Jolicoeur, P., & Peretz, I. (2009). Automatic brain responses to pitch changes in congenital amusia. Ann N Y Acad Sci, *1169*, 191-194.

- Muller-Gass, A., Marcoux, A., Logan, J., & Campbell, K.B. (2001). The intensity of masking noise affects the mismatch negativity to speech sounds in human participants. Neurosci Lett, *299*, 197-200.
- Muller-Gass, A., Stelmack, R.M., & Campbell, K.B. (2005). "...and were instructed to read a self-selected book while ignoring the auditory stimuli": The effects of task demands on the mismatch negativity. Clin Neurophysiol, *116*, 2142-2152.
- Muller-Gass, A., Stelmack, R.M., & Campbell, K.B. (2006). The effect of visual task difficulty and attentional direction on the detection of acoustic change as indexed by the Mismatch Negativity. Brain Res, *1078*, 112-130.
- Näätänen, R. (1990). The role of attention in auditory information processing as revealed by event-related potentials and other brain measures of cognitive function. Behav Brain Sci, *13*, 201-288.
- Näätänen, R. (1991). Mismatch negativity (MMN) outside strong attentional focus: a commentary on to Woldorff et al. (1991). Psychophysiology, *28*, 478-484.
- Näätänen, R. Attention and brain function. Hillsdale, NJ: Erlbaum; 1992.
- Näätänen, R., & Alho, K. (1995). Generators of electrical and magnetic mismatch responses in humans. Brain Topogr, *7*, 315-320.
- Näätänen, R., Gaillard, A.W.K., & Mäntysalo, S. (1978). Early selective-attention effect on evoked potential reinterpreted. Acta Psychol, *42*, 313-329.
- Näätänen, R., Gaillard, A.W.K., & Mäntysalo, S. Brain potential correlates of voluntary and involuntary attention. In: Kornhuber HH, Deecke L, editors. Motivation, motor and sensory processes of the brain: electrical potentials, behaviour and clinical use, progress in research, vol. 54. Amsterdam: Elsevier, 1980. pp. 343-348.

- Näätänen, R., Paavilainen, P., Tiitinen, H., Jiang, D., & Alho, K. (1993). Attention and mismatch negativity. Psychophysiology, *30*, 436-450.
- Näätänen, R., & Picton, T. W. (1986). N2 and automatic versus controlled processes. Electroencephalogr Clin Neurophysiol Suppl, *38*, 169-186.
- Näätänen, R., & Winkler, I. (1999). The concept of auditory stimulus representation in cognitive neuroscience. Psychol Bull, *125*, 826-859.
- Oades, R.D., & Dittmann-Balcar, A. (1995). Mismatch negativity (MMN) is altered by directing attention. NeuroReport, *6*, 1187-1190.
- Omigie, D., & Stewart, L. (2011). Preserved statistical learning of tonal and linguistic material in congenital amusia. Front Psychology, *2*, 1-11.
- Otten, L.J., Alain, C., & Picton, T.W. (2000). Effects of visual attentional load on auditory processing. NeuroReport, *11*, 875-880.
- Peretz, I. (2001). Brain specialization for music. New evidence from congenital amusia. Ann N Y Acad Sci, *930*, 153-165.
- Peretz, I. (sous presse). The Biological foundations of music: Insights from congenital amusia. In: D. Deutsch. *The Psychology of Music*. Elsevier.
- Peretz, I., Brattico, E., Jarvenpaa, M., & Tervaniemi, M. (2009). The amusic brain: in tune, out of key, and unaware. Brain, *132*, 1277-1286.
- Peretz, I., Brattico, E., & Tervaniemi, M. (2005). Abnormal electrical brain responses to pitch in congenital amusia. Ann Neurol, *58*, 478-482.

- Peretz, I., Champod, A. S., & Hyde, K. (2003). Varieties of musical disorders. The Montreal Battery of Evaluation of Amusia. Ann N Y Acad Sci, *999*, 58-75.
- Peretz, I., Cummings, S., & Dubé, M.-P. (2007). The Genetics of Congenital Amusia (Tone-Deafness): A Family-Aggregation Study. Am J Hum Genet, *81*, 582-588.
- Peretz, I., Gosselin, N., Tillman, B., Cuddy, L.L., Gagnon, B., Trimmer, C.G., Paquette, S., & Bouchard, B. (2008). On-Line Identification of Congenital Amusia. Music Percept, *25*, 331-343.
- Peretz, I., Saffran, J., Schön, D., & Gosselin, N. (2012). Statistical learning of speech, not music, in congenital amusia. Ann N Y Acad Sci, *1252*, 361-367.
- Peretz, I., & Zatorre, R. (2005) .Brain organization for music processing. Annu Rev Psychol, *56*, 89-114.
- Phillips-Silver, J., Toiviainen, P., Gosselin, N., Piché, O., Nozaradan, S., Palmer, C., & Peretz, I. (2011). Born to dance but beat deaf: A new form of congenital amusia. Neuropsychologia, *49*, 961-969.
- Provost, M. (2011). The prevalence of congenital amusia (dissertation). University of Montreal, Canada.
- Ruchkin, D.S., Johnson, R. JR., & Friedman, D. (1999). Scaling is necessary when making comparisons between shapes of event-related potential topographies: A reply to Haig et al. Psychophysiology, *36*, 832-834.
- Schellenberg, E.G., & Trehub, S.E. (1996). Natural musical intervals: Evidence from infant listeners. Psychol Sci, *7*, 272-277.

- Scherg, M., Vajsar, J., & Picton, T. (1989). A source analysis of the late human auditory evoked potentials. J Cognitive Neurosci, *1*, 336-355.
- Semlitsch, H.V., Anderer, P., Schuster, P., & Presslich, O. (1986). A solution for reliable and valid reduction of ocular artifacts applied to the P300 ERP. Psychophysiology, *23*, 695-703.
- Starratt, G. K., & Nash, A. J. (2004). An alternative baseline measure for calculation of the mismatch negativity (MMN) component of the event-related potential (ERP). Int J Psychophysiol, *51*, 201-208.
- Stewart, L., Von Kriegstein, K., Warren, J.D., & Griffiths, T.D. (2006). Music and the brain: disorders of music listening. Brain, *129*, 2533–2553.
- Stromswold, K. (1998). Genetics of spoken language disorders. Hum Biol, *70*, 297-324.
- Sussman, E.S. (2007). A new view on the MMN and attention debate: The role of context in processing auditory events. J Psychophysiol, *21*, 164-175.
- Sussman, E.S., Ritter, W., & Vaughan, H.G. Jr. (1998a). Attention affects the organization of auditory input associated with the mismatch negativity system. Brain Res, *789*, 130-138.
- Sussman, E.S., Winkler, I., Huottilainen, M., Ritter, W., & Näätänen, R. (2002). Top-down effects on the initially stimulus-driven auditory organization. Cognitive Brain Res, *13*, 393-405.
- Tiitinen, H., May, P., Reinikainen, K., & Näätänen, R. (1994). Attentive novelty detection in humans is governed by pre-attentive sensory memory. Nature, *372*, 90-92.

- Tillmann, B., Gosselin, N., Bigand, E., & Peretz, I. (2012). Priming paradigm reveals harmonic structure in congenital amusia. Cortex, *48*, 1073-1078.
- Tillmann, B., Janata, P., & Bharucha J.J. (2003). Activation of the inferior frontal cortex in musical priming. Brain Res Cogn Brain Res, *16*, 145-161.
- Todd, J., Michie, P.T., Schall, U., Karayanidis, F., Yabe, H., & Näätänen, R. (2008). Deviant Matters: Duration, Frequency, and Intensity Deviants Reveal Different Patterns of Mismatch Negativity Reduction in Early and Late Schizophrenia. Biol Psychiat, *63*, 58-64.
- Trehub, S.E. (2001). Musical predispositions in infancy. Ann N Y Acad Sci, *930*, 1-16.
- Tremblay, K., Kraus, N., Carrell, T.D., & McGee, T. (1997). Central auditory system plasticity: Generalization to novel stimuli following listening training. J Acoust Soc Am, *102*, 3762-3773.
- Van Selst, M., & Jolicoeur, P. (1994). A solution to the effect of sample size on outlier elimination. Exp Psychol So, *47*, 631-650.
- Verleger, R. (1988). Event-related potentials and memory: A critique of the context updating hypothesis and an alternative interpretation of the P3. Behav Brain Sci, *11*, 343-356.
- Webster, K. E., Adey, S.A., & Colrain, I.M. (2002). The effect of stimulus probability on P3 in the respiratory-related evoked potential. Psychophysiology, *39*, 9-15.
- Winkler, I. (2007). Interpreting the mismatch negativity (MMN). J Psychophysiol, *21*, 147-163.

- Woldorff, M.G., Hackley, S.A., & Hillyard, S.A. (1991). The effects of channel-selective attention on the mismatch negativity wave elicited by deviant tones. Psychophysiology, *28*, 30-42.
- Woldorff, M.G., & Hillyard, S.A. (1990). Attentional influence on the mismatch negativity. Behav Brain Sci, *13*, 261-262.
- Wong, P., Skoe, E., Russo, N., Dees, T., & Kraus, N. (2007). Musical experience shapes human brainstem encoding of linguistic pitch patterns. Nat Neurosci, *10*, 420-422.
- Yucel, G., Petty, C., McCarthy, G., & Belger, A. (2005). Graded visual attention modulates brain responses evoked by task-irrelevant auditory pitch changes. J Cogn Neurosci, *17*, 1819-1828.
- Zhang, P., Xiangchuan, C., Yuan, P., Zhang, D., & Sheng, H. (2006). The effect of visuospatial attentional load on the processing of irrelevant acoustic distractors. NeuroImage, *33*, 715-724.