

Mémoire de Recherche

Apprentissage auditif,
transfert sons harmoniques-syllabes
et traitement pré-attentif

par Audrey FORO

Sous la direction de M. BESSON et M. BARBAROUX

Stage réalisé au Laboratoire de Neurosciences Cognitives, CNRS
Université Aix Marseille
3, place Victor Hugo, centre Saint-Charles
13331 Marseille Cedex 3

Année universitaire 2016-2017

TABLE DES MATIERES

Remerciements

INTRODUCTION	1
<i>Pourquoi étudier la hauteur des sons?.....</i>	<i>4</i>
<i>Question générale.....</i>	<i>4</i>
<i>Méthode d'électroencéphalographie, Potentiels évoqués et Négativité de discordance.....</i>	<i>5</i>
<i>Question spécifique et objectifs.....</i>	<i>7</i>
<i>Hypothèses.....</i>	<i>7</i>
<i>Déroulement de l'expérience.....</i>	<i>8</i>
 MATERIEL ET METHODES.....	 8
1. <i>Participants.....</i>	<i>8</i>
2. <i>Stimuli.....</i>	<i>9</i>
<i>Sons complexes.....</i>	<i>9</i>
<i>Syllabes.....</i>	<i>9</i>
3. <i>Procédure.....</i>	<i>9</i>
<i>Test audiométrique.....</i>	<i>11</i>
<i>Test psychométriques.....</i>	<i>11</i>
<i>Test de musicalité.....</i>	<i>12</i>
<i>Etude de la perception pré-attentive (MMN)</i>	<i>12</i>
<i>Tâche psycho-acoustique.....</i>	<i>12</i>
4. <i>Acquisition du signal EEG.....</i>	<i>14</i>
<i>Electrodes et montage référentiel.....</i>	<i>14</i>
<i>Pose des électrodes.....</i>	<i>15</i>
5. <i>Traitement du signal.....</i>	<i>15</i>
6. <i>Analyses statistiques.....</i>	<i>17</i>

RESULTATS.....	17
Données comportementales: seuils psycho-acoustiques.....	17
1. <i>Tâche de discrimination de hauteur</i>	17
2. <i>Tâche de discrimination d'intensité</i>	18
Données électrophysiologiques: MMN.....	18
1. <i>Sons complexes</i>	19
a. Amplitude moyenne de la MMN en Fz (entre 170 et 250 ms après le début du stimulus).....	19
b. Latence du maximum d'amplitude de la MMN en Fz.....	21
c. Amplitude moyenne de la P3a en Fz (entre 250 et 350 ms après le début du stimulus).....	22
d. Analyse de corrélations pour les Sons complexes.....	23
i. Analyse générale sur les deux groupes de participants.....	23
ii. Analyse séparée par groupe.....	24
2. <i>Syllabes</i>	25
a. Amplitude moyenne de la MMN en Fz (entre 200 et 320 ms après le début du stimulus).....	25
b. Latence du maximum d'amplitude de la MMN en Fz.....	27
c. Amplitude moyenne de la P3a en Fz (entre 320 et 400 ms après le début du stimulus).....	28
d. Analyse de corrélation pour les Syllabes.....	28
 DISCUSSION.....	 29
<i>Discrimination des sons complexes selon leur hauteur et leur intensité</i>	29
<i>Traitement pré-attentif des sons complexes</i>	30
<i>Traitement pré-attentif des syllabes</i>	32
<i>Remarques générales, limitations et perspectives</i>	34
 REFERENCES.....	 36
 ANNEXES.....	 38
 RESUME.....	 41

Remerciements

En premier lieu je tiens à remercier Mireille BESSON, d'avoir accepté de m'encadrer et de me guider pendant ces cinq mois de stage riches en enseignements. Merci pour son implication et sa disponibilité.

Je remercie Mylène BARBAROUX, de m'avoir permis de participer à son projet de thèse. Merci pour son aide précieuse, son temps et sa bienveillance.

Je remercie également l'ensemble des membres de l'équipe Dynamique spatio-temporelle des apprentissages auditifs et moteurs pour leur accueil chaleureux.

Merci à Eva DITTINGER pour ses conseils et sa gentillesse.

Ainsi que les étudiantes Sarah, Maud, Betina, Elie, Dounia et Elizaveta pour leur sympathie.

Merci également à Bruno POUCET, directeur de l'unité, pour m'avoir acceptée au sein du Laboratoire de Neurosciences Cognitives pour effectuer ce stage.

Enfin, je remercie tous les participants qui ont accepté de participer à ce projet de recherche.

INTRODUCTION

La musique et le langage sont deux moyens de communication qui reposent principalement sur l'audition et qui sont caractérisés par des paramètres acoustiques communs : la fréquence, l'intensité, la durée et le timbre. Ces deux systèmes, linguistiques et musicaux, comprennent différents niveaux de traitement: la phonologie, la sémantique, la syntaxe, la pragmatique dans le langage et le rythme, la mélodie, l'harmonie dans la musique (Besson et coll., 2011). D'un point de vue cognitif, le traitement d'un mot et d'une note pourrait faire intervenir des processus similaires. Le développement de la neuroimagerie a permis de montrer que le traitement de la musique et du langage fait intervenir des réseaux cérébraux qui peuvent être communs ou distincts selon les caractéristiques des stimuli et de la tâche à réaliser (voir revue par Besson et coll., 2017).

Directement relié au travail de recherche que j'ai conduit dans le cadre de mon stage de M2, les musiciens professionnels montrent une plus grande sensibilité que les non-musiciens à certaines caractéristiques acoustiques des sons harmoniques complexes comme la fréquence et la durée (Koelsch, 1999). La fréquence d'un son est perçue en terme de hauteur (des aigus aux graves) et un entraînement auditif peut améliorer la perception de petites variations de ce paramètre chez les non-musiciens (Micheyl et coll., 2006).

Ces meilleures capacités chez les musiciens ne sont pas exclusivement observées dans le domaine de la musique : les résultats de la littérature montrent que la pratique soutenue d'un instrument de musique exerce une influence positive sur les capacités langagières, et que les musiciens professionnels sont par exemple avantagés dans des tâches de catégorisation de syllabes variant en hauteur (Dittinger et coll., 2016). Ce phénomène correspond à un *effet de transfert d'apprentissage*: l'expérience musicale influence la perception et la compréhension du langage à plusieurs niveaux tels que la catégorisation phonologique, la segmentation des mots dans le flux continu de parole et le traitement de la syntaxe (Kraus et Chandrasekaran 2010; Besson et coll., 2011; revue Besson et coll., 2017). Les résultats d'études récentes ont également montré que l'expertise musicale peut influencer le traitement sémantique du langage (Cooper et Wang 2012; Dittinger et coll., 2016, 2017).

Les recherches actuelles tentent de caractériser les différences entre musiciens et non-musiciens dans le traitement du langage et de la musique, de déterminer à quel niveau l'expertise musicale peut intervenir, et ce qui dans l'entraînement musical peut faciliter le traitement du langage.

Des résultats récents de Dittinger et collaborateurs (2016) ont montré que l'influence de l'expertise musicale s'étend à l'apprentissage du sens de nouveaux mots. Les résultats de cette étude ont mis en évidence un encodage sémantique plus rapide chez les musiciens et une meilleure rétention à long-terme de ces mots (5 mois après). Ces résultats au niveau comportemental s'accompagnent d'une signature électrophysiologique de cet encodage, mise en évidence par l'analyse des potentiels évoqués (voir description ci-dessous) et, en particulier, la composante N400 découverte par Kutas et Hillyard en 1980. Cette composante est liée aux processus d'intégration sémantique et elle est générée en réponse à la présentation de mots dont le sens est connu. Cependant, l'amplitude de la composante N400 est d'autant plus grande que le mot est inattendu dans le contexte de la phrase, comme en cas d'incongruité sémantique (par exemple "Il tartine son pain avec des chaussettes"). Dans l'expérience de Dittinger et coll. (2016), les participants (musiciens ou non-musiciens) ont effectué une série de tâches linguistiques pendant l'enregistrement de leur électroencéphalogramme (voir Figure 1). Ils ont tout d'abord effectué une tâche de catégorisation phonologique de mots monosyllabiques (issus de la langue thaï) présentant des variations de hauteur (par exemple /ba/ et /ba*/), de durée (/ba/ et /baa/), de voisement (/ba/ et /pa/) et d'aspiration (/pa/ et /pha/). Le sens de ces mots a ensuite été appris par association image-mot et les participants ont réalisé une tâche de correspondance et d'association sémantique afin d'évaluer cet apprentissage. L'analyse des données comportementales (mesure des temps de réaction et des taux d'erreurs) et électrophysiologiques (potentiels évoqués) a montré une influence positive de l'expertise musicale dans ces différentes tâches linguistiques. Ainsi, les musiciens ont obtenu de meilleurs niveaux de performance dans les tâches catégorisation, en particulier pour les contrastes phonémiques n'appartenant pas à la langue française, et dans la tâche sémantique. En outre, le développement de la composante N400 associée à l'acquisition du sens des mots était plus rapide chez les musiciens que chez les non-musiciens pendant la phase d'apprentissage, et son amplitude était plus grande dans les tâches de correspondance et d'association sémantique. Enfin, sa distribution était centro-pariétale chez les musiciens tandis qu'elle était plutôt frontale chez les non-musiciens. Ces résultats sont interprétés comme une meilleure capacité d'intégration du sens de nouveaux mots dans le réseau sémantique chez les musiciens que chez les non-musiciens.

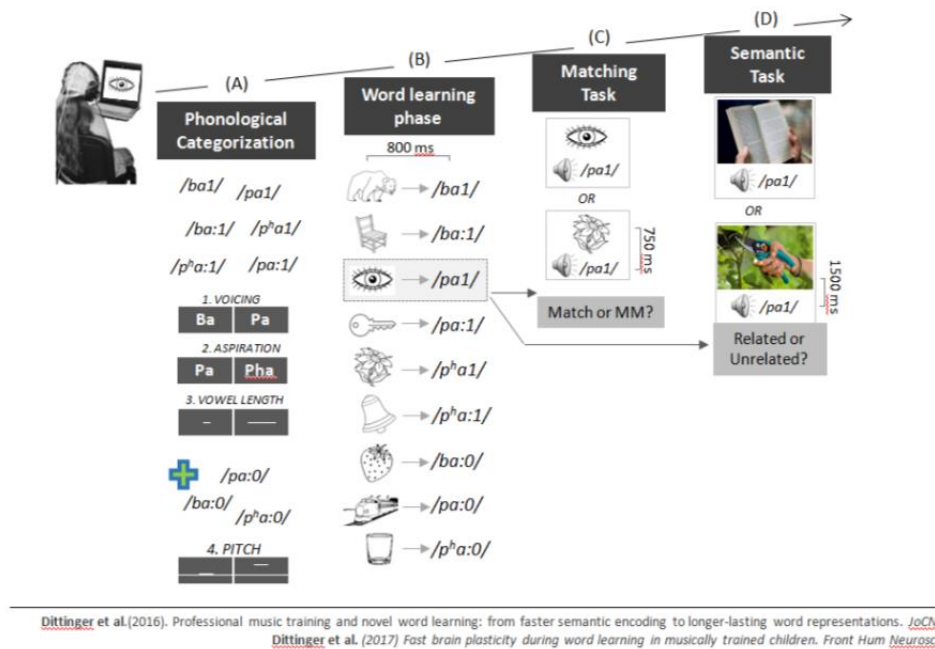


Figure 1: *Protocole expérimental de la tâche d'apprentissage de mot de Dittinger et coll, (2016). A : tâche de catégorisation phonologique des syllabes issues du Thaï; B : tâche d'apprentissage du sens des syllabes par association image-mots; C : tâche de correspondance image-mot; D : tâche d'association sémantique.*

Pour expliquer ces résultats, Dittinger et coll. (2016) proposent deux hypothèses:

- **L'hypothèse en cascade** ("bottom up"): la pratique musicale de haut niveau entraîne une meilleure perception des sons chez les musiciens ("une oreille musicale"). Cela leur permet de construire des représentations phonologiques plus stables et plus fiables lors de la présentation auditive des syllabes. Lors de l'apprentissage par association image-mot, cet avantage perceptif facilite l'association d'un sens à ces mots et ensuite leur intégration dans le réseau sémantique.
- **L'hypothèse multidimensionnelle** ("top down"): l'entraînement que suivent les musiciens professionnels permet également d'améliorer des capacités cognitives telles que l'attention auditive, la mémoire à court et long-terme et les fonctions exécutives liées, selon Miyake et coll. (2000), à la flexibilité cognitive, le contrôle inhibiteur et la mémoire de travail (Strait 2010; George et Coch 2011; Moradzadeh et coll., 2015), qui sont essentielles à l'apprentissage du sens de nouveaux mots.

Il est important de noter que ces deux hypothèses sont plus complémentaires qu'exclusives. D'une part, une meilleure perception acoustique permet un effet "bottom-up" où un meilleur encodage des caractéristiques physiques des stimuli auditifs influence positivement les traitements de plus haut niveau comme les processus associatifs (image-mot et intégration sémantique).

D'autre part, les capacités de haut niveau citées plus haut permettent un effet "top down" qui a également une influence positive sur les processus associatifs et la perception auditive.

Pourquoi étudier la hauteur des sons?

Dans le cadre de ce mémoire, je m'intéresse à l'hypothèse en cascade et plus spécifiquement à la perception de la hauteur des sons. C'est un paramètre très important dans la musique, car les variations de hauteur permettent l'émergence de mélodies. Concernant le langage, la hauteur des sons est également pertinente pour une grande majorité des langues du monde. En effet, la plupart des langues d'Asie et d'Afrique sont des langues tonales, c'est-à-dire que les variations de hauteur changent la signification des mots (dans la langue Thaï et le Chinois Mandarin, par exemple). Concernant la langue française, la modulation de la hauteur a une valeur prosodique (par exemple une augmentation de hauteur à la fin d'une phrase permet de savoir qu'elle est interrogative et une diminution qu'il s'agit d'une phrase déclarative). Des travaux plus anciens ont montré que les musiciens perçoivent ces variations prosodiques mieux que les non-musiciens (Schön et coll., 2004). Or, les musiciens professionnels ont à leur actif des milliers d'heures d'entraînement durant lesquelles ils perçoivent et manipulent en particulier la hauteur des sons.

Question générale

Mon sujet de mémoire s'articule autour de la question suivante : l'avantage observé chez les musiciens pour l'apprentissage de nouveaux mots s'explique-t-il par leur meilleure perception de la hauteur des sons musicaux et linguistiques ?

L'objectif est donc de tester l'hypothèse en cascade, et pour répondre à cette question, une étude longitudinale a été mise en place dans laquelle des non-musiciens suivent un entraînement visant à améliorer leur perception de la hauteur de sons harmoniques complexes. L'hypothèse est que si les résultats de Dittinger et coll. (2016) sont liés au fait que les musiciens sont avantagés pour traiter les hauteurs, entraîner des non-musiciens à mieux percevoir des petites variations de hauteur permettra d'améliorer leur niveau de performance dans les tâches de discrimination de hauteurs, de catégorisation de syllabes variant en hauteur et dans l'apprentissage de nouveaux mots issus d'une langue tonale. Ces améliorations devraient également être associées à une évolution de leur profil électrophysiologique avec l'entraînement.

Méthode d'électroencéphalographie, Potentiels évoqués et Négativité de discordance

Concernant la méthode utilisée, je me concentre dans ce mémoire sur le recueil de données électrophysiologiques pour étudier les effets de l'apprentissage perceptif. Mon travail repose principalement sur la méthode d'électroencéphalographique (EEG) et en particulier sur l'analyse d'une composante particulière des potentiels évoqués: la négativité de discordance ou MMN (Mismatch Negativity).

L'EEG est une technique permettant d'enregistrer l'activité électrique corticale, à l'aide de plusieurs électrodes placées sur le scalp. Cette méthode a une très bonne résolution temporelle (qui dépend de la fréquence d'échantillonnage). L'activité mesurée présente une amplitude relativement faible (mesurée en μV) et correspond aux potentiels post-synaptiques générés par les neurones. Au niveau cellulaire, l'excitation des neurones au niveau de leurs dendrites engendre un courant et l'ouverture de canaux ioniques. Ceci, produit un déplacement de charges à la fois dans le milieu intracellulaire et dans le milieu extracellulaire. Ce courant, dit volumique, est à l'origine des variations de potentiel enregistrées à la surface du scalp. En outre, l'activité enregistrée dépend des propriétés et de l'architecture des connections corticales: pour observer des variations du signal EEG il est nécessaire d'avoir une bonne synchronisation des populations de neurones et une sommation de leur activité, essentiellement les cellules pyramidales dont les dendrites sont organisées en macro-colonnes perpendiculaires au scalp.

Dans le cadre de ce travail, nous nous intéressons à l'activité électrique corticale associée à la perception d'un stimulus auditif. Les tracés sont synchronisés temporellement à la présentation des stimuli et l'activité spécifique à un stimulus est ensuite sommée et moyennée de manière à améliorer le rapport signal/bruit du signal et obtenir des potentiels évoqués (Dawson 1954). Ces derniers sont analysés selon leur morphologie, leur latence et amplitude qui émerge du bruit de fond de l'activité cérébrale.

Parmi les différentes composantes des potentiels perceptifs et cognitifs mis en évidence dans la littérature, je m'intéresse en particulier à la MMN; une composante découverte par Näätänen en 1978. Les données de la littérature suggèrent qu'elle reflète un niveau pré-attentif (automatique) du traitement de l'information. C'est une composante négative qui apparaît environ entre 100 et 300 ms après la présentation du stimulus. Elle est maximale au niveau des aires frontales avec une inversion de polarité au niveau des mastoïdes. Certains résultats suggèrent que les réseaux générateurs de la MMN sont localisés au niveau temporo-frontal. Les aires temporelles supérieures (aires auditives)

sont associées à la détection pré-perceptive d'un changement auditif et les aires frontales (avec une dominance hémisphérique droite) au processus d'orientation automatique de l'attention provoquée par ce changement auditif et reflété par la composante P3a (revue Näätänen et coll., 2007).

Le paradigme expérimental permettant de générer la MMN est pré-attentif, c'est-à-dire que le participant ne prête pas attention aux stimuli qui lui sont présentés car il regarde en même temps un film muet. On présente au participant un stimulus répété (standard) remplacé de façon pseudo-aléatoire (voir méthodes) par des stimuli qui peuvent être très (grands déviants), moyennement (moyens déviants) ou peu différents (petits déviants) du stimulus standard. La MMN correspond à la différence d'activité évoquée par les stimuli déviant et standard (déviant moins standard). Classiquement, une augmentation de la négativité est observée lors de la présentation d'un stimulus déviant, et elle est d'autant plus ample que le déviant est très différent du standard et donc plus facile à détecter (Pakarinen et coll., 2007). Cette négativité reflète les capacités du participant à discriminer le stimulus déviant de la trace du stimulus standard présente en mémoire sensorielle (ou échoïque). C'est une détection automatique qui peut ensuite être suivie d'une orientation également automatique de l'attention vers le stimulus, reflétée par la composante P3a.

D'autres résultats montrent que les musiciens présentent une MMN plus ample pour des déviants de hauteur (Koelsch et coll., 1999; Chandrasekaran et coll., 2009) ou de durée (Marie et coll., 2012) de stimuli non langagiers. Par ailleurs, la MMN peut être modulée (augmentation de l'amplitude et/ou une diminution de la latence) suite à quelques séances d'entraînement perceptif ce qui témoigne de la plasticité du système auditif. Cet effet a été mis en évidence par Näätänen et coll. (1993b) dans une expérience où les participants apprenaient à discriminer des sons harmoniques variant en hauteur. En outre, cet effet se retrouve aussi dans le cas des sons du langage, avec des syllabes de différentes hauteurs (Kaan et coll., 2007; Wang et coll., 2011).

Une autre composante, la composante P3a, peut être générée à la suite de la MMN. C'est une onde positive visible au niveau des électrodes frontales, environ 300 ms après la présentation du stimulus déviant (Sutton et coll., 1965). Elle est liée à l'effet de surprise provoqué par le stimulus déviant et l'orientation automatique de l'attention du participant vers ce stimulus. Une composante P3b peut être observée au niveau des aires pariétales dans le cas d'un protocole attentif (où le participant recherche activement les stimuli déviants): elle reflète plutôt les processus de mémorisation et la prise de décision vis-à-vis d'un stimulus.

Question spécifique et objectifs

De façon plus spécifique, l'objectif sur lequel je me suis focalisée dans ce travail est de tester le transfert d'apprentissage des sons non langagiers (sons complexes) vers des sons langagiers (syllabes) au niveau pré-attentif.

Pour ce faire, les participants ont été répartis en deux sous-groupes entraînés sur une tâche de discrimination de sons complexes en utilisant une méthode issue de la psychophysique:

- Un groupe expérimental entraîné sur la perception de hauteur (variations en Hz)
- Un groupe de contrôle entraîné sur la perception de l'intensité (variations en dB)

Avant et après cet entraînement, les participants effectuent des tests de discrimination auditive de hauteur et d'intensité, et leur perception est étudiée à un niveau pré-attentif (MMN) lors de la présentation de sons complexes et de syllabes présentant des variations de hauteur.

Hypothèses

À l'issue de l'expérience on devrait observer une diminution des seuils de discrimination (Micheyl et coll., 2006) spécifiques à l'entraînement suivi par les participants (hauteur ou intensité). Il est également possible qu'ils montrent une petite amélioration générale (transfert au niveau du paramètre acoustique sur lequel les participants ne sont pas entraînés) liée à l'effet de la répétition (familiarisation avec la tâche) et à une amélioration de l'attention auditive. En outre, la MMN associée aux variations de hauteur devrait être plus largement modifiée après un entraînement focalisé sur la perception de hauteur qu'après un entraînement centré sur l'intensité. Plus précisément, on devrait observer une augmentation d'amplitude et une diminution de la latence de la MMN associée à la perception de fines variations de hauteur de sons complexes, qui ne sont pas détectées avant l'entraînement. En d'autres termes, l'amélioration du traitement pré-attentif de la perception de la hauteur devrait être plus grande pour des déviants proches de la trace standard que pour les déviants très différents du standard.

Par ailleurs, si un transfert d'apprentissage se produit, le traitement pré-attentif des syllabes variant en hauteur devrait être facilité par l'entraînement sur la hauteur des sons comparé à l'entraînement sur l'intensité.

Une hypothèse alternative serait que l'évolution soit équivalente pour les deux groupes et donc liée uniquement à l'effet de répétition des stimuli et à une amélioration générale de l'attention auditive. Dans ce cas, le simple fait de s'entraîner sur des sons (quel que soit le paramètre acoustique mis en jeu) serait suffisant pour améliorer les capacités de discrimination des participants pour les deux paramètres (hauteur et intensité).

Déroulement de l'expérience

La procédure générale comprend 5 sessions durant lesquelles le participant va suivre un entraînement perceptif avec des sons harmoniques complexes, précédés et suivis de plusieurs tests. Cet entraînement, basé sur les méthodes de la psycho-acoustique, consiste à discriminer des différences de hauteur, ou d'intensité pour le groupe de contrôle, de plus en plus fines.

Mon travail de stage s'inscrit dans un protocole plus large incluant d'autres expériences ayant pour but d'étudier l'effet d'un entraînement perceptif sur l'apprentissage de nouveaux mots chez les non-musiciens. Cependant, dans ce mémoire je ne présente que les résultats concernant le traitement pré-attentif des sons complexes et des syllabes reflété par la MMN.

MATERIEL ET METHODES

1. Participants

Un total de 32 participants sont prévus dans ce protocole. Cependant, jusqu'à présent nous avons testé un total de 22 adultes droitiers de 19 à 30 ans (16 femmes et 6 hommes). Ils étaient tous de langue maternelle française et non bilingues, ils n'avaient jamais pratiqué d'instrument de musique de façon continue, ils n'avaient pas de problème auditif ou neurologique et ils n'avaient jamais participé à des expériences de psycho-acoustique auparavant. Leur audition a été testée grâce à un test audiométrique avec des sons purs, et tous les participants avaient un seuil inférieur à 20 dB HL entre 500 et 8000 Hz.

Les participants ont été répartis dans deux groupes de façon pseudo-aléatoire: un groupe s'entraînant à discriminer la hauteur des sons (moyenne d'âge: 22.9 ans, écart-type: 2.9 ans) et un groupe de contrôle entraîné à discriminer l'intensité des sons (moyenne d'âge: 23.9 ans, écart-type: 3.0 ans). L'analyse statistique n'a pas montré de différence d'âge significative entre les deux groupes ($F < 1$).

Les participants ont été informés des détails de la procédure expérimentale. Cette étude a été réalisée selon les procédures prescrites dans la déclaration d'Helsinki pour la protection des personnes et approuvée par le comité d'éthique local. Le consentement écrit de chaque participant a été recueilli avant le début de l'expérience. Chacun a reçu une compensation de 100€ en échange de sa participation.

2. *Stimuli*

Sons complexes : les sons complexes standards ont une fréquence fondamentale (F_0) de 195 Hz, une durée de 327 ms, et une intensité de 60 dB. Ces valeurs ont été choisies car elles correspondent aux valeurs moyennes des mots monosyllabiques présentés dans l'expérience. Les sons complexes ont été utilisés dans la tâche psycho-acoustique et dans la tâche de MMN.

Syllabes : Les stimuli standards /ba/ ont une F_0 de 195 Hz, une durée de voyelle de 327 ms, une intensité de 60 dB, et un VOT¹ de -73 ms (durée totale de 400 ms).

Pour la tâche de MMN, avec les sons complexes et avec les syllabes, trois types de déviants ont été construits. La F_0 du son ou de la syllabe standard (195 Hz) a été augmentée (à l'aide du logiciel « Praat », Boersma & Weenink, 2011) à 235 Hz pour les Grands déviants (+40Hz, 20% d'augmentation), à 215 Hz pour les déviants Moyens (+20Hz, 10% d'augmentation) et à 200Hz pour les Petits déviants (+5Hz, 2% d'augmentation).

3. *Procédure*

Cette expérience est basée sur une approche longitudinale: pré-entraînement, entraînement, post-entraînement. Les différentes tâches sont réparties en 5 sessions (voir Tableau1) séparées d'au moins une journée et réparties sur environ deux semaines. La première session inclut l'expérience de MMN, la tâche de catégorisation phonologique, et la mesure des seuils pré-entraînement. Lors des sessions 2 à 4, les participants sont entraînés avec la méthode psycho-acoustique et effectuent divers tests psychométriques. Enfin, la dernière session inclut les mêmes tests que la session 1, ainsi qu'une tâche d'apprentissage de mots et les tests associés.

¹ VOT : Voice Onset Time, qui correspond au délai de voisement (temps entre la production d'une consonne occlusive et le début de la vibration des cordes vocales)

Protocole général

Pré-entraînement
<u>Session 1</u> Test audiométrique EEG: MMN (syllabes + sons complexes) EEG: Tâche de catégorisation de syllabes Psycho-acoustique: mesure des seuils de hauteur et d'intensité (20 blocs d'essais pour chaque paramètre)
Entraînement
<u>Session 2</u> Tests psychométriques: Mémoire des chiffres et Fluence verbale Entraînement (30 blocs) en hauteur ou en intensité selon le groupe
<u>Session 3</u> Tests psychométriques: Attention auditive et Latraces WAIS Entraînement (30 blocs) en hauteur ou en intensité selon le groupe
<u>Session 4</u> Test psychométrique: D2-R Entraînement (30 blocs) en hauteur ou en intensité selon le groupe
Post-entraînement
<u>Session 5</u> Psycho-acoustique: fin de l'entraînement, mesure des seuils de hauteur et d'intensité (10 blocs d'essais pour chaque paramètre) Test de musicalité EEG: MMN: syllabes + sons complexes EEG: Tâche de catégorisation de syllabes EEG: Apprentissage de mots + tâches associées

Tableau 1: Organisation des tâches lors des 5 sessions expérimentales

Lors de l'enregistrement de l'EEG et de la passation des tâches comportementales, les participants sont testés individuellement et installés dans un fauteuil placé dans une cage de Faraday. Ils sont assis devant un écran d'ordinateur utilisé pour la présentation des images. Les stimuli auditifs sont présentés de façon binaurale à travers un casque (Sennheiser, HD600) à 60 dB. Pour la présentation des stimuli, le logiciel "Présentation" (NeuroBehaviouralSystem, Version11.0) est

utilisé pour présenter les stimuli dans les expériences EEG, et le logiciel Matlab (2010) dans la tâche psycho-acoustique. Pour les tâches comportementales une presselle de réponse est placée dans chacune des mains des participants (la main de réponse est contrebalancée entre les participants).

Test audiométrique: des sons de différentes fréquences (de 125 à 8000 Hz) sont présentés au participant, qui doit en diminuer l'intensité jusqu'à atteindre sa limite perceptive. L'audiogramme obtenu représente l'intensité du son (dB) en fonction de la fréquence (Hz) du son émis. Ce test permet de vérifier l'intégrité de la perception auditive du participant.

Test psychométriques: ces différents tests sont décrits ci-dessous car j'ai assisté à leur passation. Cependant, les résultats ne sont pas décrits dans ce mémoire car ils n'ont pas encore été traités.

- *Mémoire des chiffres:* tâche de rappel direct et inverse issu de la batterie WAIS-III (Wechsler, 1997) pour évaluer la mémoire auditive à court-terme et la mémoire de travail. Le participant doit répéter une suite de chiffres qui lui sont dictés (de 2 à 9 chiffres au maximum) dans l'ordre normal ou inverse.
- *Fluence verbale* (Cardebat et coll., 1990) pour 2 lettres et 2 catégories avec un temps de réponse limité à 1 minute. L'objectif de la tâche est de citer le plus de mots commençant par la lettre ou appartenant à une catégorie donnée par l'expérimentateur (les lettres P et R; les catégories animaux et fruit). Ce test permet d'évaluer la capacité du participant à accéder à son répertoire lexical.
- *Attention auditive:* "Associated Responses test" (adapté de la batterie NEPSY-II pour enfants, Korkman et coll., 2012, en augmentant la vitesse de présentation des stimuli de 20%). Le participant écoute un enregistrement et doit répondre à l'occurrence de certains mots pendant l'écoute. La réponse consiste à désigner un cercle de couleur (noir, bleu, rouge ou jaune) lorsque l'une de ces couleurs est citée. Cependant, il n'y a pas de correspondance entre la couleur énoncée et la couleur du cercle à désigner (par exemple, le cercle jaune doit être désigné lorsque le mot rouge est entendu). Ce test évalue ainsi l'attention sélective soutenue et la vigilance.
- *Capacités cognitives non verbales:* matrices de la batterie WAIS-III en utilisant une limite de 30 secondes par matrice. Celles-ci sont composées de quatre items dont un manquant. Le participant doit identifier parmi cinq réponses possibles l'item complétant la matrice. Ce test fait appel au raisonnement logique.

- *Attention visuelle*: D2-R (Brickenkamp et coll., 2015). Ce test consiste à barrer des caractères cibles (la lettre "d" accompagnée de deux traits) parmi des caractères distracteurs (par exemple la lettre "p" accompagnée de deux traits) ce qui permet d'évaluer la capacité du sujet à mobiliser son attention pour discriminer des détails visuels, et à la soutenir tout au long de la tâche.

Test de musicalité: un test mélodique et un test rythmique (adaptation de la batterie MBEA; Peretz, Chapod et Hyde, 2003) sont présentés, chacun avec 18 paires de mélodies jouées au piano. Le participant doit décider si deux phrases musicales présentées successivement sont identiques ou différentes, au niveau de la mélodie ou du rythme.

Etude de la perception pré-attentive (MMN): Le protocole utilisé pour générer la MMN utilise des variations de hauteur des stimuli. Durant l'enregistrement le participant reçoit pour consigne de regarder un film muet sous-titré (présenté sur un lecteur DVD portable) sans prêter attention aux stimuli auditifs qui lui sont présentés. L'expérience comprend 2 parties, syllabes et sons complexes, d'une durée de 12,2 minutes chacun. L'ordre de présentation est contrebalancé entre les participants. Le stimulus standard est répété 15 fois avant la présentation du premier son déviant. Les trois types de sons déviants (grand, moyen, petit) sont présentés de façon pseudo-aléatoire (pas de répétition immédiate du même son déviant et sans que plus de deux déviants identiques ne soient présentés successivement) dans la séquence de sons, avec une occurrence de 10% chacun. Au total, 1200 stimuli sont présentés (840 répétitions du standard et 120 répétitions de chaque déviant). L'intervalle entre le début de présentation de deux stimuli est de 600ms.

Tâche psycho-acoustique: La méthode s'inspire de celle utilisée par Micheyl et coll., (2006), qui ont montré que 4 à 8 heures d'entraînement peuvent être suffisantes chez des non-musiciens pour leur permettre d'atteindre des seuils perceptifs équivalents à ceux obtenus chez des musiciens. Nous avons utilisé une procédure adaptative à choix forcé entre deux réponses. Le participant entend deux sons présentés successivement : un son standard, et un son de comparaison qui diffère (selon la tâche), par sa hauteur ou par son intensité ($\pm \Delta f$ en Hz ou $\pm \Delta i$ en dB). Le son standard et le son de comparaison sont présentés dans un ordre aléatoire. La consigne est de déterminer lequel de ces sons est le plus aigu ou le plus fort (selon la tâche) en appuyant sur les deux presselles de réponses correspondantes. Le temps de réponse n'est pas pris en compte. Le participant a un retour visuel sur l'avancement du bloc et l'évolution de ses réponses (voir Figure 2): une courbe se construit au fur à mesure des essais, elle représente la différence Δ entre les 2 sons en fonction du nombre d'essais

réalisés. Les réponses correctes sont indiquées par une pastille verte et les réponses incorrectes par une pastille rouge.

Au début d'un bloc, le Δ entre les deux stimuli correspond à 20% du son standard. Si le participant donne deux réponses correctes, Δ diminue d'un facteur 2 (ou augmente de ce même facteur si la réponse est incorrecte). A partir de 4 inversions de la courbe (matérialisées par les étoiles rouges), Δ diminue ou augmente d'un facteur $\sqrt{2}$. Le bloc prend fin à la 12ème inversion et le seuil est calculé : il s'agit de la moyenne de la valeur Δf ou Δi sur les 8 dernières inversions. Le seuil obtenu est donc une estimation de la plus petite différence perceptible par le participant.

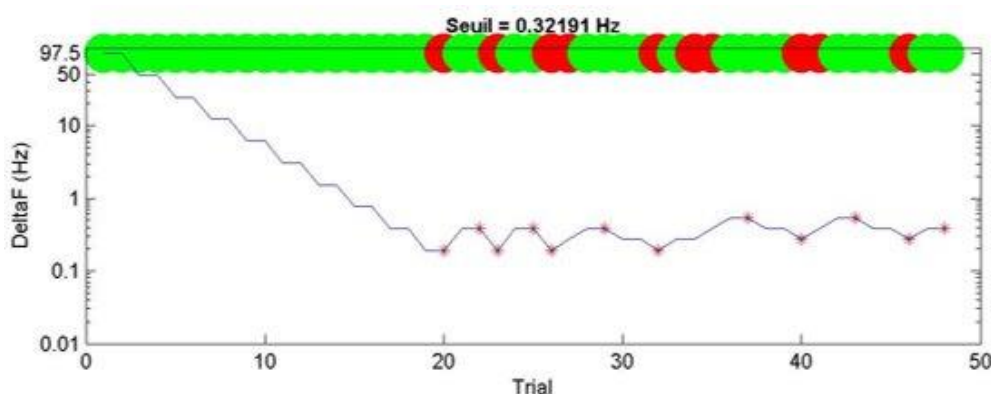


Figure 2: Exemple de courbe vue par le participant pendant un bloc d'essais de discrimination de hauteur de sons complexes; la différence entre les deux stimuli (ici en Hz) est représentée en fonction du nombre d'essais.

Lors de la session pré-entraînement, les participants réalisent 20 blocs d'essais en hauteur, et 20 en intensité afin de les familiariser avec la tâche (apprentissage procédural), et de permettre une première mesure des seuils perceptifs. Ils réalisent 30 blocs lors de chacune des 3 sessions d'entraînement suivantes (90 blocs). Ils réalisent 10 blocs lors de la session post-entraînement, dans les deux tâches hauteur et intensité. L'ordre des tâches est contrebalancé entre les participants. En résumé, les participants font 120 blocs liés au paramètre acoustique sur lequel ils sont entraînés et 30 blocs liés à l'autre paramètre, pour une durée totale d'environ 5h (soit 1h30 + 3x1h + 30min) sachant que la durée d'un bloc est d'environ 1,5 min.

Une courbe de tendance est ajustée sur les seuils psycho-acoustiques ainsi obtenus (valeur des seuils en fonction des blocs, voir Figure 3). Les valeurs des seuils pré- et post-entraînement sont calculées au point d'intersection avec la courbe, respectivement aux blocs 20 et 120 dans le paramètre entraîné, et aux blocs 20 et 30 dans le paramètre non-entraîné.

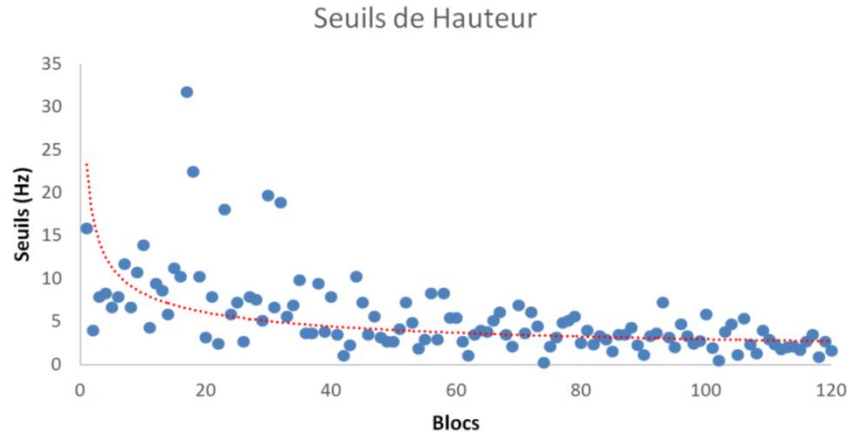


Figure 3: Exemple de courbe de tendance représentant les seuils de hauteur obtenus en fonction du nombre de blocs effectués par le participant

4. Acquisition du signal EEG

L'activité électrique cérébrale a été recueillie en continu à partir de 32 électrodes Ag/Cl (système Biosemi; Amsterdam, BioSemi Active 2). Chaque électrode est munie d'un pré-amplificateur, permettant d'amplifier directement le signal électrique au niveau du scalp et de réduire ainsi le bruit de fond de l'EEG et le bruit ambiant. Les électrodes sont branchées sur une A/D box (Analog to digital box, Biosemi) qui échantillonne et amplifie le signal à une fréquence de 512Hz avec une bande passante de 0 à 102.4 Hz et qui est relié à un PC d'acquisition par l'intermédiaire d'un boîtier récepteur (receiver box Biosemi). Le montage est représenté dans la Figure 4.

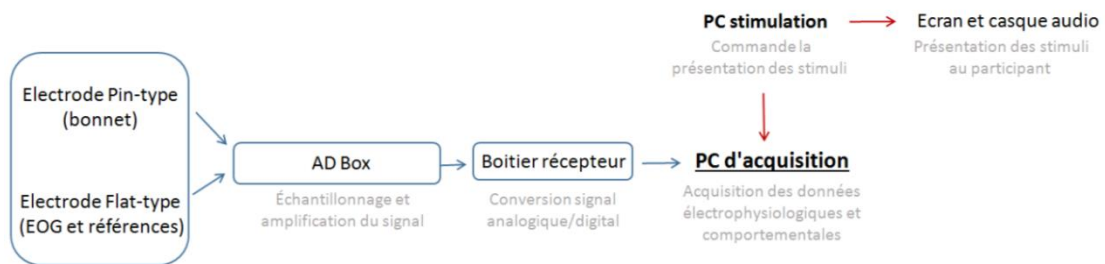


Figure 4: Schéma du montage nécessaire à l'acquisition du signal

Électrodes et montage référentiel: Deux types d'électrode sont nécessaires. Des électrodes actives (pin-types) sont montées sur un bonnet aux positions standard du système international 10/20 (Jasper, 1958). L'impédance des électrodes est maintenue en dessous de 5kΩ. Le bonnet contient une électrode active CMS (Common Mode Sense) utilisée comme référence par défaut et une électrode passive DRL (Drive Right Leg, reliée à la terre). Nous utilisons un montage référentiel où l'activité

des électrodes du scalp est mesurée par rapport à une activité de référence (différence de potentiel entre l'électrode active du bonnet et la référence neutre).

Des électrodes dites libres (flat-type) sont positionnées au niveau des mastoïdes droite et gauche. On calcule ensuite lors du traitement des données, la moyenne de l'activité sur ces deux électrodes, qui sert alors d'activité de référence. L'épaisseur de l'os mastoïdien permet de réduire la sensibilité de l'électrode à l'activité d'origine corticale. En outre, cette configuration bilatérale permet de s'affranchir des effets de latéralisation de l'activité cérébrale. Enfin, une électrode de référence nasale est ajoutée pour l'analyse de la MMN. Ceci permet de vérifier l'inversion typique de polarité de la MMN enregistrée entre les électrodes frontales et mastoïdiennes. Cependant, la quantification de la MMN est réalisée sur les données référencées par rapport aux mastoïdes car le rapport signal sur bruit est meilleur (Kujala et coll., 2007).

Enfin, trois électrodes enregistrent l'électro-oculogramme horizontal (2 électrodes placées à 1cm à gauche et à droite des canthi externes) et vertical (une électrode placée sous l'œil droit) pour éliminer par la suite les artéfacts liés aux mouvements oculaires.

Pose des électrodes: dans un premier temps la peau du participant est nettoyée à l'alcool pour améliorer le contact des électrodes avec la peau et un quadrillage est fait à l'aide d'un bâtonnet en bois pour améliorer la conductance des électrodes placées sur les mastoïdes (références). Ensuite, une ceinture qui servira à attacher le bonnet est placée sur le buste du participant. La circonférence de la tête est mesurée pour choisir la taille du bonnet. La distance entre le nasion et l'inion est mesurée pour bien positionner le bonnet (repère du placement des électrodes frontales qui se situe à 10% de la distance mesurée à partir du nasion). Avant de clipser les électrodes pin-type sur le bonnet, du gel (Signagel) est injecté dans les trous du casque en écartant les cheveux. Les électrodes peuvent ensuite être branchées à l'A/D box et le signal EEG est vérifié sur le PC d'acquisition (logiciel Actiview, Biosemi).

5. *Traitement du signal*

L'analyse est effectuée à l'aide du logiciel Brain Vision Analyser (Version 1.05.0005; Brain Product, München, Germany). Les données sont re-référencées par rapport à la moyenne de l'activité des deux électrodes mastoïdiennes ou de l'électrode nasale pour la MMN. On effectue un pré-traitement du signal pour éliminer certains artéfacts contenus dans les données brutes: il s'agit de perturbations du signal non liées à la tâche et qui peuvent avoir une origine interne physiologique (ex: clignement des yeux, contraction musculaire) ou externe tel que le bruit électrique.

Un filtre passe-bas (12dB/oct) est utilisé pour atténuer les hautes fréquences supérieures à 30Hz et un filtre coupe-bande pour éliminer les fréquences de 50Hz causées par le bruit électrique. On applique également un filtre passe-haut (12dB/oct) pour atténuer les basses fréquences inférieures à 1Hz (d'après Kujala et coll., 2007).

L'application de l'analyse en composantes indépendantes (ICA, Independent Component Analysis) nous permet par la suite d'identifier et d'éliminer les artefacts associés aux mouvements des yeux. Il s'agit d'une méthode de décomposition du signal permettant d'isoler les différentes sources de variations du tracé, en l'occurrence celle du clignement des yeux, que l'on peut ensuite éliminer du signal tout en gardant les segments contaminés.

L'analyse des potentiels évoqués est synchronisée sur la présentation des stimuli. Ils sont isolés grâce à la segmentation du signal en fenêtres temporelles de 700ms incluant 100ms de ligne de base avant la présentation du stimulus. Ensuite les portions segmentées sont catégorisées selon le type de stimulus (standard, déviants).

La dérive du signal est corrigée en appliquant un "DC Detrend" sur les segments, une correction de la ligne de base est appliquée afin de la recentrer sur zéro, et un filtre de rejet d'artefacts permet d'exclure les segments dont l'activité enregistrée dépasse l'intervalle de $-75/75\mu V$ autour de la ligne de base.

Le moyennage se divise en deux étapes successives: un premier moyennage intra-participant est réalisé en faisant la moyenne de l'ensemble des réponses évoquées pour un stimulus donné chez un même participant, puis un deuxième moyennage inter-participant ou "grand moyennage" est réalisé qui consiste à regrouper les données des différents participants et de les moyennner par groupe.

La MMN est obtenue en faisant la différence entre les potentiels évoqués par les stimuli déviants moins les stimuli standard pour chaque participant. Les MMNs obtenues sont comparées avant et après entraînement pour les deux groupes de participants impliqués dans un entraînement perceptif de hauteur ou d'intensité, pour les sons complexes et pour les syllabes en fonction des différentes conditions expérimentales (Grands, Moyens et Petits déviants).

Nous réalisons ici une analyse d'amplitude et de latence des maxima d'amplitude (pics) de la MMN sur l'électrode Fz dans des fenêtres temporelles choisies après analyse visuelle individuelle des tracés (voir Tableau 4). Seules ces analyses sont rapportées dans ce mémoire. Les électrodes² F3, Fz, F4, C3, Cz, C4, P3, Pz et P4 seront utilisées ultérieurement pour l'analyse de l'amplitude

² F : frontal ; C : central ; P : pariétal ; 3 : gauche ; z : ligne médiane ; 4 : droite

moyenne des effets, dans deux fenêtres temporelles choisies à partir des données de la littérature et de l'inspection visuelle des tracés pour la MMN et la P3a (valeur moyenne des amplitudes mesurées dans l'intervalle choisi en μV).

6. *Analyses statistiques*

Les données sont analysées en calculant des analyses de variances (ANOVAs) à l'aide du logiciel Statistica (Version 12.0, StatSoft, Inc., Tulsa, OK). Le seuil de significativité est fixé à $p < 0.05$ et des tests post-hoc de Tukey, réduisant la probabilité d'erreurs de type I, ont permis de déterminer l'origine des interactions significatives.

RESULTATS

Données comportementales: seuils psycho-acoustiques

Les ANOVAs incluent les facteurs Groupes (hauteur vs intensité) comme facteur inter-sujets et le facteur Session (pré- vs post-entraînement) comme facteur intra-sujets.

1. *Tâche de discrimination de hauteur*

L'effet principal du facteur Groupe n'était pas significatif mais l'effet du facteur Session l'était (Annexe 2). Les seuils moyens diminuent de 2.48 Hz à 1.26 Hz entre pré- et post-entraînement. L'interaction entre les effets des facteurs Groupe et Session était significative (Annexe 2): la diminution des seuils de hauteur était significative pour le groupe Hauteur (pré: 2.59 Hz, post: 0.71 Hz, Tukey test : $p = .003$) mais pas pour le groupe Intensité (pré: 2.36 Hz, post: 1.82 Hz, Tukey test: $p = .60$), voir Figure 5.

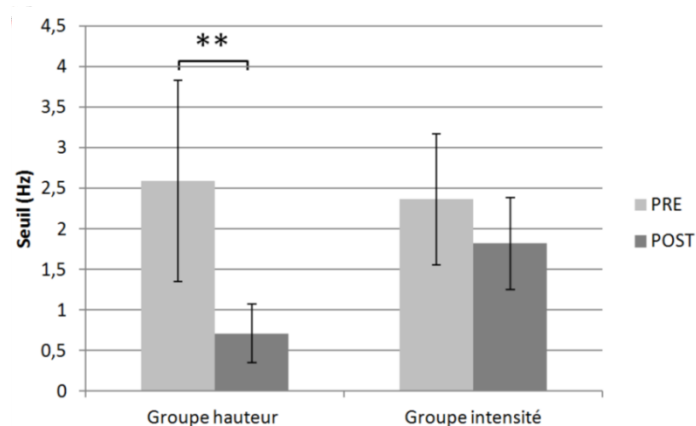


Figure 5: Seuils moyens de hauteur mesurés avant (PRE) et après (POST) entraînement sur la hauteur ou sur l'intensité. Les barres d'erreur représentent l'écart type.

2. *Tâche de discrimination d'intensité*

L'effet principal du facteur Groupe n'était pas significatif mais l'effet du facteur Session l'était (Annexe 2). Les seuils moyens diminuent de 1.30 à 1.09 dB entre pré- et post-entraînement. L'interaction entre les effets des facteurs Groupe et Session était marginalement significative (Annexe 2). Néanmoins, pour tester directement nos hypothèses, nous avons utilisé le test de Tukey qui est un test post-hoc dit "conservateur", c'est-à-dire qu'il diminue la probabilité des erreurs de type I (i.e. rejeter l'hypothèse de différence nulle alors qu'elle est vraie). Les résultats révèlent que la diminution des seuils d'intensité était significative pour le groupe Intensité (pré-entraînement: 1.30 dB, post-entraînement: 1.09 dB, Tukey test : $p=.01$) mais pas pour le groupe Hauteur (Tukey test: $p=.90$), voir Figure 6.

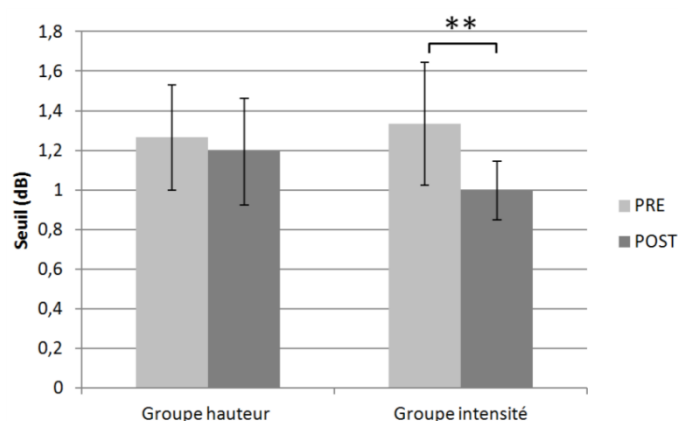


Figure 6: Seuils moyens d'intensité mesurés avant (PRE) et après (POST) entraînement sur la hauteur ou sur l'intensité. Les barres d'erreur représentent l'écart type .

Nous avons ensuite calculé les différences des seuils perceptifs avant et après entraînement pour le groupe intensité et le groupe hauteur et ceci pour chaque paramètre (hauteur et intensité). Cependant, les analyses de corrélations n'ont pas mis en évidence de corrélations entre l'amélioration de la perception de la hauteur et de l'intensité (les résultats correspondants ne sont pas rapportés).

Données électrophysiologiques: MMN

Les ANOVAs incluent le facteur Groupe (hauteur vs intensité) comme facteur inter-sujets et les facteurs Session (pré- vs post-entraînement) et Déviants (grand, moyen et petit) comme facteur intra-sujets.

1. Sons complexes

Les MMNs sont représentées Figure 7 et 8 (voir Annexe 1 pour les potentiels évoqués correspondants).

a. Amplitude moyenne de la MMN en Fz (entre 170 et 250 ms après le début du stimulus)

L'effet principal du facteur Groupe n'était pas significatif mais les effets principaux des facteurs Session et Déviants l'étaient (Annexe 3). L'amplitude moyenne de la MMN était plus grande en post- (-1.65 μ V) qu'en pré-entraînement (-1.16 μ V) et plus grande pour les Grands déviants (-2.48 μ V) que pour les déviants Moyens (-1.40 μ V) et que pour les Petits déviants (-0.33 μ V; Tukey test: $p < .001$ entre chaque déviants). Les interactions Session x Groupe; Session x Déviant; Groupe x Déviant et Session x Déviant x Groupe n'étaient pas significatives.

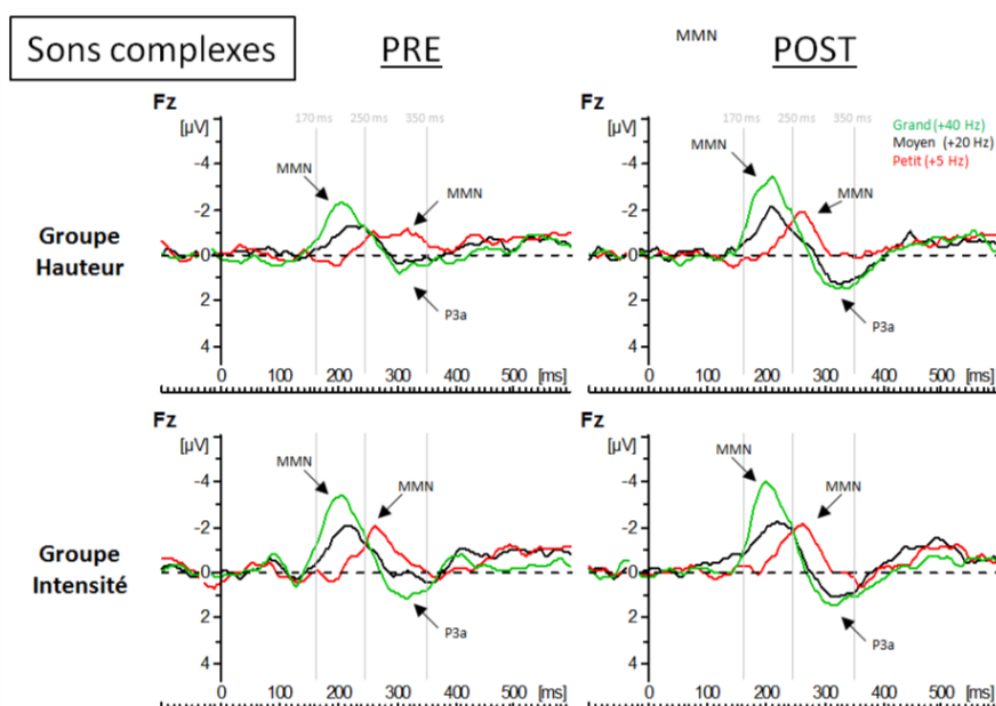


Figure 7: Ondes de différence ou MMN (Déviant - Standard) des potentiels évoqués enregistrés en Fz avant (PRE) et après entraînement (POST) pour les participants ayant suivi un entraînement en hauteur ou en intensité. Les tracés illustrent la MMN générée par des sons complexes (les petits déviants en rouge, les moyens déviant en noir et les grands déviants en vert).

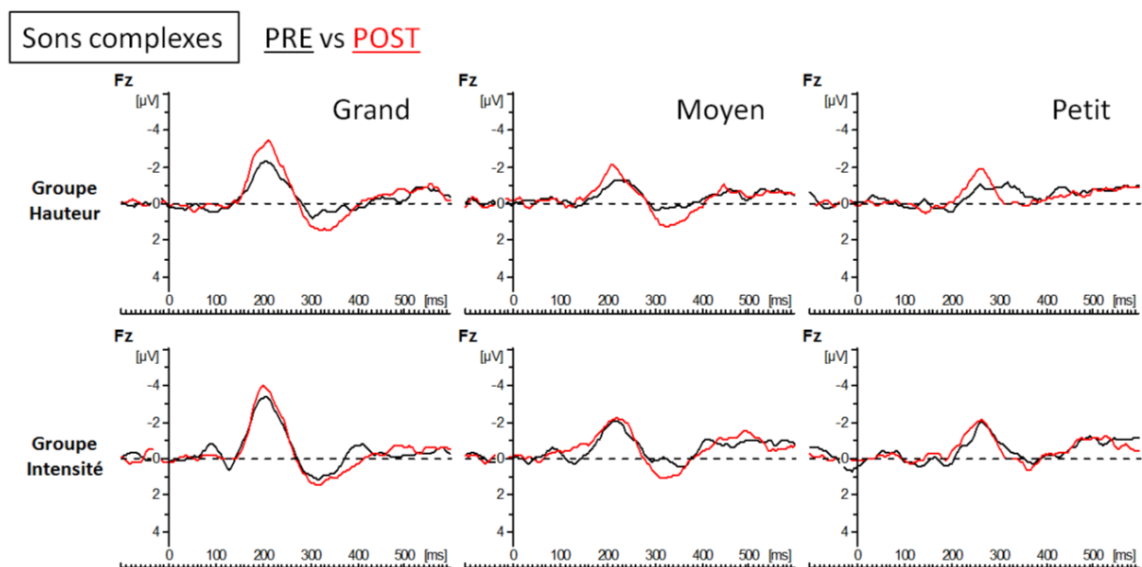


Figure 8: MMN enregistrée en Fz avant (PRE en noir) et après entraînement (POST en rouge) pour chaque déviant.

Pour mieux comprendre nos résultats nous avons effectué d'autres analyses en considérant chaque déviant séparément, et en calculant l'amplitude moyenne de la MMN dans un rang de latence centré sur le maximum d'amplitude de la MMN (20 ms ; voir Annexe 5).

- *Grand déviant*: l'effet principal du facteur Groupe n'était pas significatif mais l'effet de Session l'était (Annexe 4). L'amplitude moyenne de la MMN était plus grande en post- ($-3.46 \mu V$) qu'en pré-entraînement ($-2.70 \mu V$). L'interaction entre les effets des facteurs Groupe et Session n'était pas significative.
- *Moyen déviant*: Ni l'effet principal du facteur Groupe, ni l'interaction Session x Groupe n'étaient significatifs mais l'effet du facteur Session était marginalement significatif ($-1.56 \mu V$ en pré-entraînement et $-2.05 \mu V$ en post-entraînement; voir Annexe 4).
- *Petit déviant*: l'effet principal du facteur Groupe n'est pas significatif mais l'effet du facteur Session l'était (Annexe 4). L'amplitude moyenne de la MMN était plus grande en post- ($-1.87 \mu V$) qu'en pré-entraînement ($-1.32 \mu V$). En outre, l'interaction entre les effets des facteurs Groupe et Session était marginalement significative (Annexe 4). Cependant, les résultats des tests de Tukey montrent que l'augmentation de l'amplitude de la MMN en post- comparé à pré-entraînement était significative dans le groupe Hauteur (Tukey test : $p=.03$) mais pas dans le groupe Intensité (Tukey test : $p=.98$), voir Figure 9.

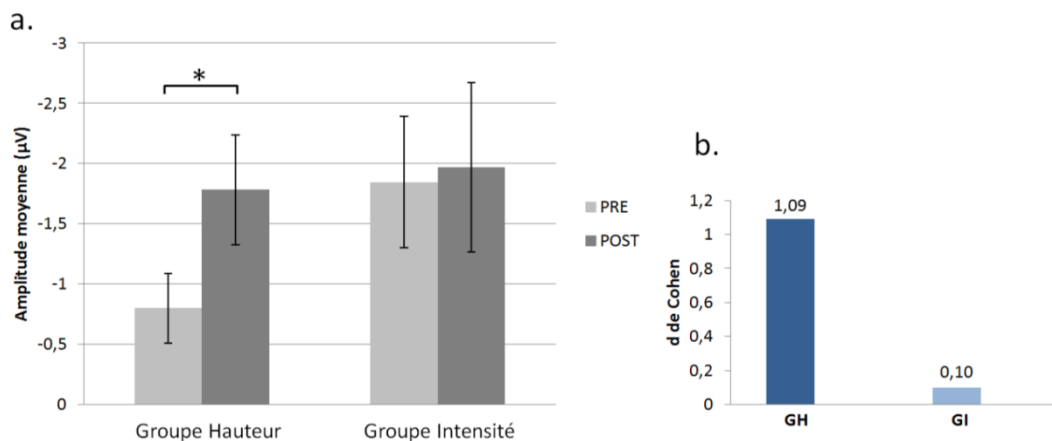


Figure 9: **a. Amplitude moyenne de la MMN en Fz associée aux Petits déviants en hauteur** avant (PRE) et après (POST) entraînement en hauteur ou en intensité, **b. taille d'effets associés** (GH: Groupe hauteur, GI: Groupe intensité). Les barres d'erreur représentent l'écart type .

b. Latence du maximum d'amplitude de la MMN en Fz

Les effets principaux des facteurs Groupe, Session et Déviants étaient significatifs (Annexe 3). La latence de la MMN était plus courte dans le Groupe Intensité (230 ms) que dans le groupe Hauteur (246 ms); plus courte en post- (224 ms) qu'en pré- entraînement (251 ms) et plus courte pour les Grands déviants (206 ms) que pour les déviants Moyens (225 ms) et que pour les Petits déviants (283 ms). En outre, l'interaction entre les effets des facteurs Groupe et Session était significative (Annexe 3): la diminution de latence de la MMN en post- comparé à pré-entraînement était significative dans le groupe Hauteur (Tukey test : $p=.001$) mais pas dans le groupe Intensité (Tukey test : $p=.42$). L'interaction Session x Déviants était également significative (Annexe 3): la diminution de latence de la MMN en post- comparé à pré-entraînement était significative pour les Petits déviants et pour les déviants Moyens mais pas pour les Grand déviants. Enfin, l'interaction Groupe x Session x Déviants était aussi significative (Annexe 3): la diminution de latence de la MMN associée aux Petits déviants en post- comparé à pré-entraînement était significativement plus grande dans le groupe Hauteur que dans le groupe Intensité (Tukey test : $p=.001$) alors que la latence de la MMN suscitée par les Grands et les déviants Moyens n'était pas différente dans les deux groupes, voir Figure 10. Les latences moyennes de chaque déviant pour chaque groupe sont reportées dans l'Annexe 5.

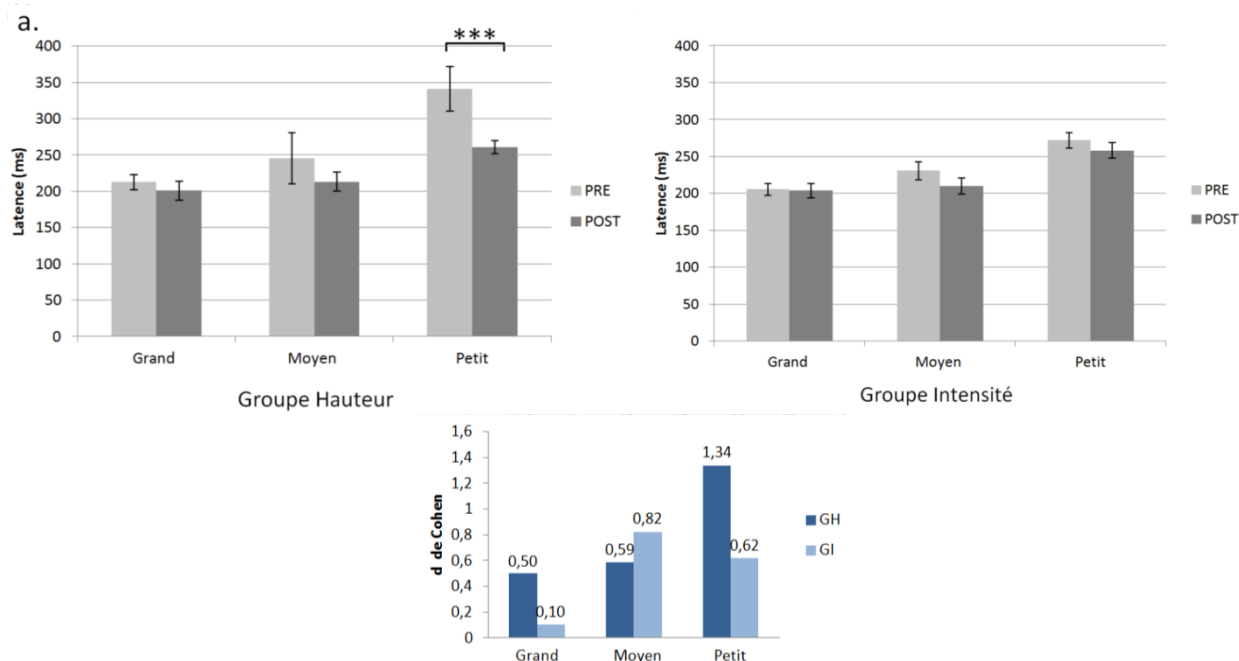


Figure 10: a. **Latence moyenne de la MMN en Fz pour chaque déviant** avant (PRE) et après (POST) entraînement en hauteur ou en intensité, b. taille d'effets associés (GH: Groupe hauteur, GI: Groupe intensité). Les barres d'erreur représentent l'écart type .

c. Amplitude moyenne de la P3a en Fz (entre 250 et 350 ms après le début du stimulus)

L'effet principal du facteur Groupe n'était pas significatif mais les effets principaux des facteurs Session et Déviants l'étaient (Annexe 3). L'amplitude moyenne de la P3a était plus grande en post- ($-0.15 \mu V$) qu'en pré-entraînement ($-0.21 \mu V$) et plus grande pour les Grands déviants ($0.55 \mu V$) que pour les déviants Moyens ($0.18 \mu V$) et que pour les Petits déviants ($-0.82 \mu V$). Les interactions Session x Groupe; Session x Déviant; Groupe x Déviant et Session x Déviant x Groupe n'étaient pas significatives (Annexe 3).

Comme pour la MMN, nous avons effectué d'autres analyses en considérant chaque déviant séparément, et en calculant l'amplitude moyenne de la P3a dans un rang de latence centré sur le maximum d'amplitude de la P3a (20 ms, voir Annexe 5):

- *Grand déviant*: l'effet principal du facteur Groupe n'était pas significatif mais l'effet de Session l'était (Annexe 4). L'amplitude moyenne (positivité) de la P3a était plus grande en post- ($1.43 \mu V$) qu'en pré-entraînement ($0.81 \mu V$). L'interaction entre les effets des facteurs Groupe et Session n'était pas significative.

- *Moyen déviant*: l'effet principal du facteur Groupe n'était pas significatif mais l'effet de Session l'était (Annexe 4). L'amplitude moyenne de la P3a était plus grande en post- (1.17 μ V) qu'en pré-entraînement (0.16 μ V). L'interaction entre les effets des facteurs Groupe et Session n'était pas significative.
- *Petit déviant*: les effets principaux des facteurs Groupe et Session étaient significatifs (Annexe 4). L'amplitude moyenne de la P3a était plus grande pour le groupe Intensité (0.33 μ V) que le groupe Hauteur (-0.46 μ V) et plus grande en post- (0.28 μ V) qu'en pré-entraînement (-0.56 μ V). L'interaction entre les effets des facteurs Groupe et Session n'était pas significative. Cependant, les résultats des analyses séparées par groupe montrent un effet significatif du facteur Session uniquement pour le groupe Hauteur (pré: -0.97 μ V et post: 0.04 μ V, $F(1,21)= 5.69$, $p=.03$) mais pas pour le groupe Intensité (pré: 0.16 μ V et post: 0.55 μ V, $F<1$), voir Figure 11.

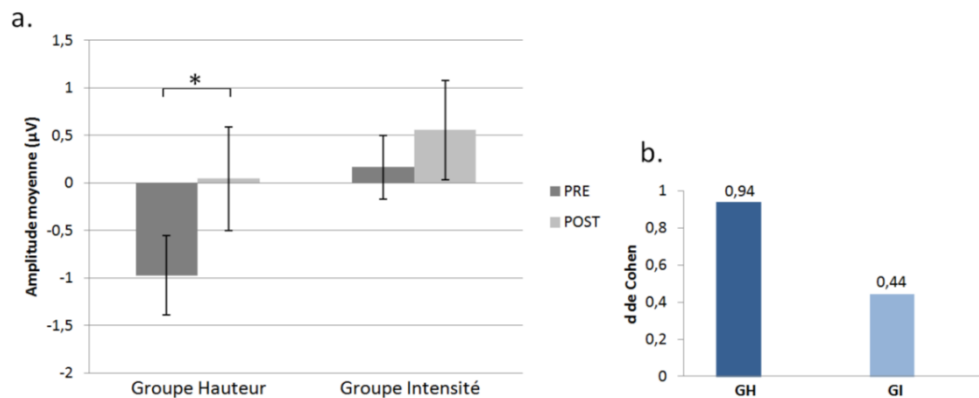


Figure 11: **Amplitude moyenne de la P3a pour les Petits déviants** avant (PRE) et après (POST) pour l'entraînement en hauteur en intensité et b. taille d'effets associés (b. ; GH: Groupe hauteur, GI: Groupe intensité). Les barres d'erreur représentent l'écart type .

d. Analyse de corrélations pour les Sons Complexes

Ces analyses avaient pour but d'étudier les relations entre les niveaux de performance dans la tâche psycho-acoustique et l'activité cérébrale au niveau pré-attentif (MMN).

Analyse générale sur les deux groupes de participants : L'amélioration des seuils de hauteur (Delta Pré-Post) en pré- comparé à post-entraînement était corrélée aux différences (Delta Post-Pré) de latence et d'amplitude maximale de la MMN entre pré- et post-entraînement uniquement pour les Petits déviants (Tableau 2 et Figure 12). Aucune corrélation n'a été trouvée pour les seuils d'intensité.

Analyse générale	Sons Complexes	Delta seuil hauteur	Delta seuil intensité
Delta de latence MMN	Grands déviants	$r=-.01, p=.97$	$r=.25, p=.26$
	Moyens déviants	$r=-.15, p=.50$	$r=-.11, p=.63$
	Petits déviants	$r=-.46, p=.03$	$r=.16, p=.48$
Delta d'amplitude maximale MMN	Grands déviants	$r=-.25, p=.26$	$r=-.16, p=.49$
	Moyens déviants	$r=.12, p=.58$	$r=-.06, p=.79$
	Petits déviants	$r=-.51, p=.01$	$r=-.25, p=.26$

Tableau 2: Pour tous les participants, corrélations entre la latence et l'amplitude de la MMN générée par des sons complexes et les seuils perceptifs pour chaque paramètre

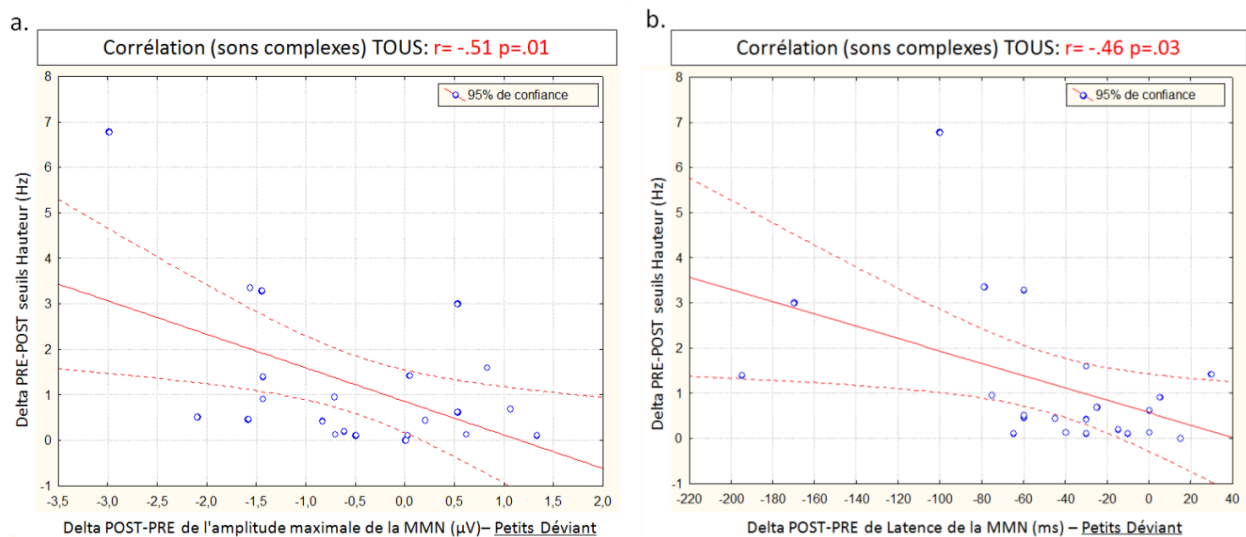


Figure 12: a. Pour tous les participants, corrélation entre les seuils de hauteur et l'amplitude de la MMN générée par les Petits déviants, b. Pour tous les participants, corrélation entre les seuils de hauteur et la latence de la MMN générée par les Petits déviants

Analyse séparée par groupe : Pour le groupe Hauteur, l'amélioration des seuils de hauteur en post-comparé à pré-entraînement était corrélée aux différences d'amplitude de la MMN entre pré- et post-entraînement pour les Petits déviants ($r = .65, p=.03$) mais cette corrélation n'est pas significative pour le groupe Intensité ($r = .16, p=.63$; voir Figure 13).

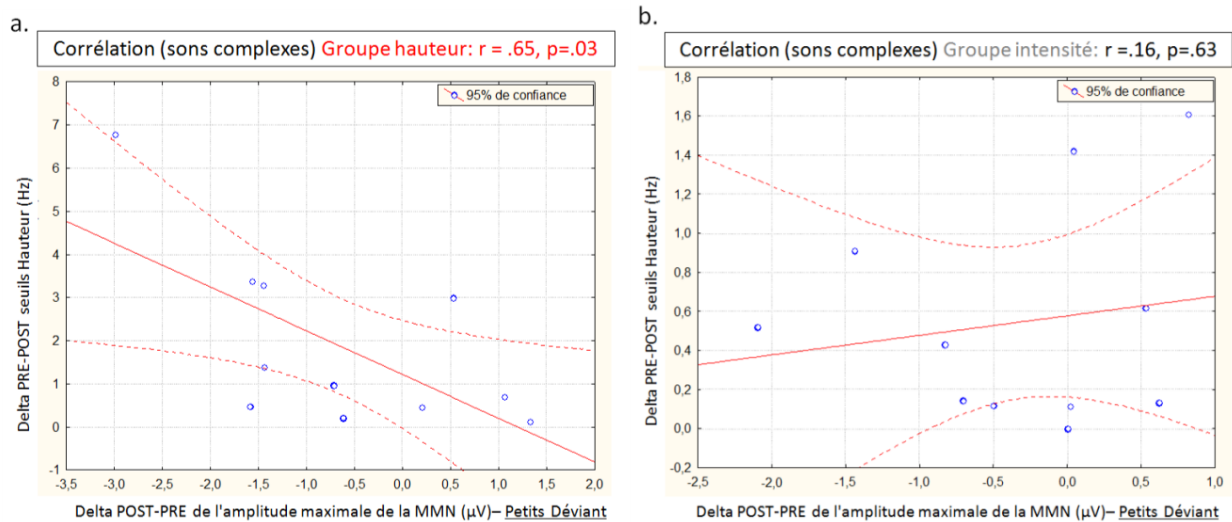


Figure 13: a. Corrélation entre les seuils de hauteur et l'amplitude de la MMN générée par les Petits déviants pour le groupe entraîné sur la perception de la hauteur des sons, b. Absence de corrélation entre les seuils de hauteur et l'amplitude de la MMN générée par les Petits déviants pour le groupe entraîné sur la perception de l'intensité des sons

2. Syllabes

Les MMNs sont représentées Figure 14 et 15 (voir Annexe 1 pour les potentiels évoqués correspondants).

a. Amplitude moyenne de la MMN en Fz (entre 200 et 320 ms après le début du stimulus)

L'effet principal du facteur Session n'était pas significatif mais les effets principaux des facteurs Groupe et Déviants l'étaient (Annexe 3). L'amplitude moyenne de la MMN était plus petite pour le groupe Hauteur ($-0.14 \mu V$) que pour le groupe Intensité ($-0.51 \mu V$) et plus grande pour les Grands déviants ($-0.68 \mu V$) que pour les déviants Moyens ($-0.30 \mu V$) et les Petits déviants ($-0.01 \mu V$). La différence d'amplitude moyenne entre les Moyens et Petits déviants n'était que marginalement significative (Tukey test : $p < .07$). En outre les interactions Session x Groupe; Session x Déviants; Groupe x Déviants et Session x Déviants x Groupe n'étaient pas significatives (Annexe 3).

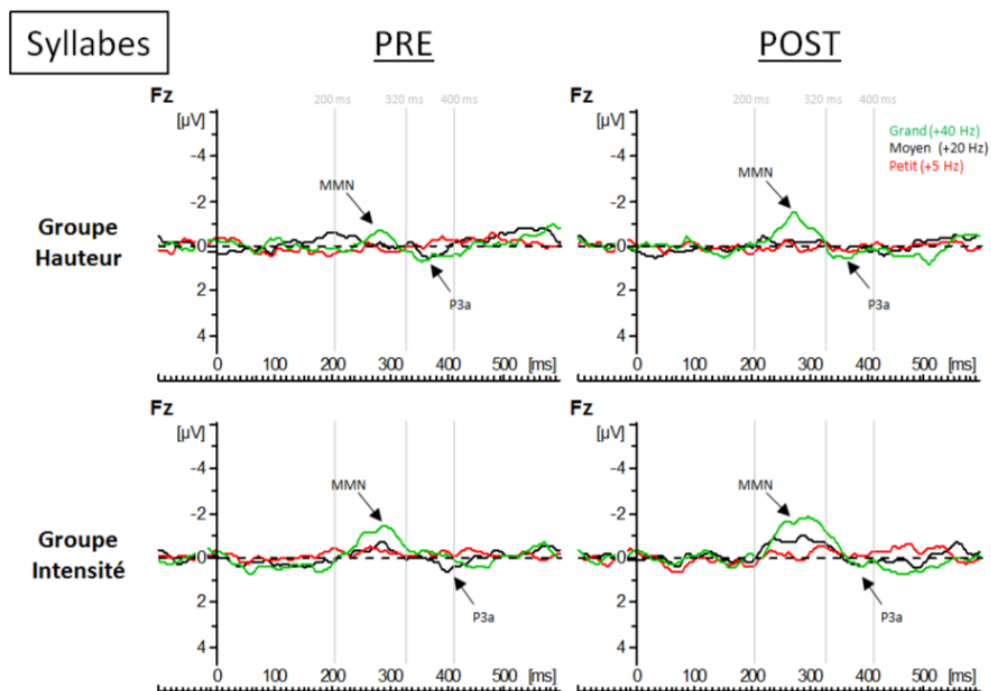


Figure 14: Ondes de différences (Déviant - Standard) des potentiels évoqués enregistrés sur l'électrode Fz représentant la MMN avant (PRE) et après entraînement (POST) pour les deux groupes de participants. Les tracés illustrent la MMN générée par des syllabes (les petits déviants en rouge, les moyens déviants en noir et les grands déviants en vert).

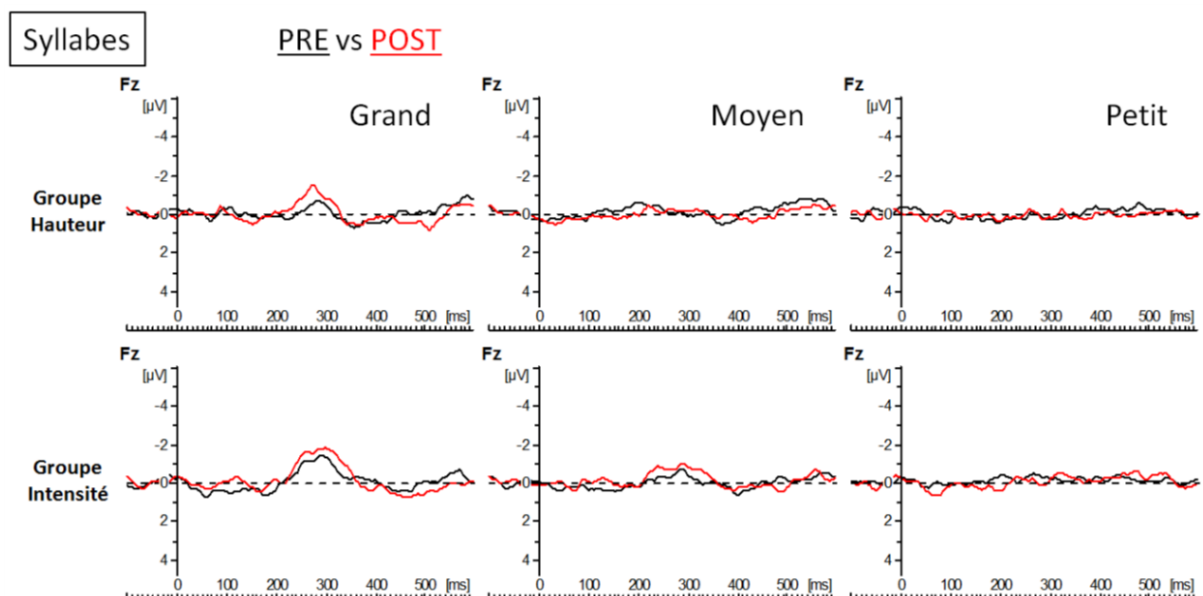


Figure 15: MMN enregistrée sur l'électrode Fz avant (PRE en noir) et après entraînement (POST en rouge) pour chaque déviant.

Pour mieux comprendre nos résultats nous avons effectué d'autres analyses en considérant chaque déviant séparément, et en calculant l'amplitude moyenne de la MMN dans un rang de latence centré sur le maximum d'amplitude de la MMN (20 ms, voir Annexe 5):

- *Grand déviant*: l'effet principal du facteur Groupe n'était pas significatif mais l'effet de Session l'était (Annexe 4). L'amplitude moyenne de la MMN était plus grande en post- (1.45 μ V) qu'en pré-entraînement (-0.78 μ V). L'interaction entre les effets des facteurs Groupe et Session n'était pas significative.
- *Moyen déviant*: Ni les effets principaux des facteurs Groupe et Session, ni l'interaction Session x Groupe n'étaient significatifs (Annexe 4).
- *Petit déviant*: Ni les effets principaux des facteurs Groupe et Session, ni l'interaction Session x Groupe n'étaient significatifs (Annexe 4).

b. Latence du maximum d'amplitude de la MMN en Fz

Les analyses de latence de la MMN ont été réalisées pour les Grands déviants et les Moyens déviants. Pour ces derniers, aucun effet significatif n'a été observé. En outre, les données n'ont pas été analysées pour les Petits déviants car les MMNs ne sont pas observables ni sur les moyennages individuels ni sur les grands moyennages. Les résultats pour les Grands déviants (Annexe 4 et 7) sont rapportés ci-dessous.

- *Grand déviant*: L'effet principal du facteur Groupe était significatif mais pas l'effet principal du facteur Session. La latence de la MMN était plus courte dans le Groupe Hauteur (287 ms) que dans le groupe Intensité (300 ms). En outre, l'interaction entre les effets des facteurs Groupe et Session était significative (Tableau 3): la latence de la MMN en post-entraînement était significativement plus courte pour le groupe Hauteur (273 ms) que pour le groupe Intensité (303 ms ; Tukey test: $p=.007$) alors que la différence entre groupes n'était pas significative en pré-entraînement (groupe Hauteur: 300 ms et groupe Intensité: 296 ms, Tukey test: $p=.96$). Les latences moyennes de chaque groupe sont reportées dans l'Annexe 6.

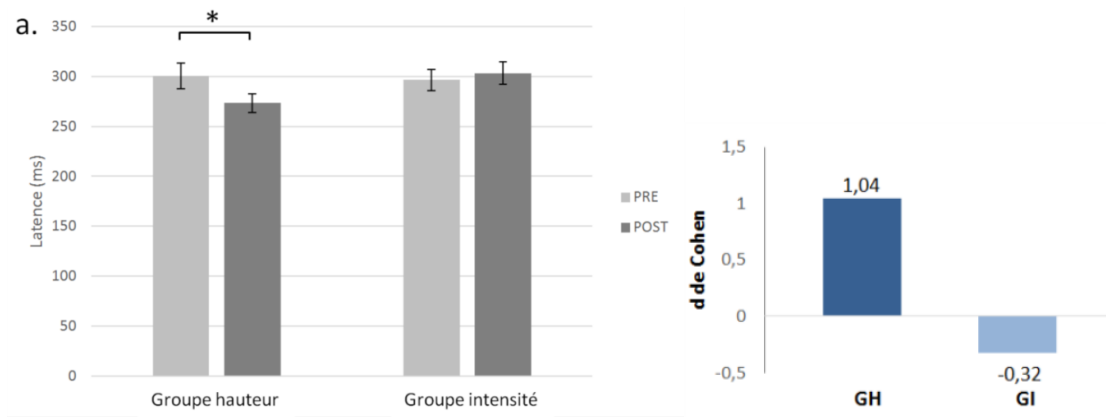


Figure 16: a. **Latence moyenne de la MMN associée au Grand déviant** avant (PRE) et après (POST) entraînement en hauteur ou en intensité, b. taille d'effets associées (b. ; GH: Groupe hauteur, GI: Groupe intensité). Les barres d'erreur représentent l'écart type .

c. Amplitude moyenne de la P3a en Fz (entre 320 et 400 ms après le début du stimulus)

Comme pour la MMN, nous avons effectué des analyses en considérant chaque déviant séparément, et en calculant l'amplitude moyenne de la P3a dans un rang de latence centré sur le maximum d'amplitude de la P3a (20 ms ; voir Annexe 5).

Les effets principaux des facteurs Groupe, Session et Déviant n'étaient pas significatifs ni les interactions Session x Groupe, Session x Déviant et Session x Déviant x Groupe. En revanche l'interaction Groupe x Déviant l'était (Annexe 3).

Cependant, les analyses séparées pour chaque déviant ne révèlent pas d'effets significatifs : ni les effets principaux des facteurs Groupe et Session, ni l'interaction Session x Groupe n'étaient significatifs (Annexe 4).

d. Analyse de corrélation pour les Syllabes

Nous avons fait des analyses de corrélation entre l'évolution des seuils (Delta Pré-Post en hauteur et en intensité) et les différences (Delta Post-Pré) de latence et d'amplitude de la MMN entre pré- et post-entraînement. Aucune d'entre elles n'était significative (Tableau 3).

<i>Analyse générale</i>	Syllabes	Delta seuil hauteur	Delta seuil intensité
Delta de latence MMN	Grands déviants	$r=-.14, p=.53$	$r=.32, p=.14$
Delta d'amplitude maximale MMN	Grands déviants	$r=.25, p=.26$	$r=.24, p=.27$

Tableau 3: Analyse générale de corrélation entre l'évolution de la latence et de l'amplitude maximale de la MMN générée par des syllabes et l'évolution des seuils perceptifs de chaque paramètre.

DISCUSSION

Les objectifs de cette expérience étaient d'étudier l'effet d'un entraînement basé sur une méthode psychophysique sur la perception de sons harmoniques complexes au niveau pré-attentif et de tester un potentiel transfert d'apprentissage vers des syllabes présentant des caractéristiques acoustiques similaires. Deux groupes de participants ont suivi un entraînement qui avait pour but d'améliorer la perception de la hauteur (groupe expérimental) ou de l'intensité des sons (groupe de contrôle). Selon notre hypothèse principale, l'apprentissage en hauteur devrait permettre à la fois d'améliorer les capacités de discrimination pré-attentive des sons complexes et des syllabes variants en hauteur.

Discrimination des sons complexes selon leur hauteur et leur intensité

L'utilisation de la méthode psychophysique nous a permis d'étudier l'évolution de la perception des sons avec l'apprentissage. Conformément à nos hypothèses, les seuils mesurés après entraînement étaient plus bas qu'avant entraînement (voir Figures 5 et 6). Ainsi, et en accord avec les données de la littérature, les apprentissages ont été efficaces en permettant aux participants d'améliorer leurs capacités de discrimination de variations acoustiques fines de sons variants en hauteur ou en intensité (Michey et coll., 2006).

L'entraînement spécifique à la perception des hauteurs a permis aux participants de diminuer leurs seuils perceptifs de 2 Hz en moyenne après environ 5h d'apprentissage (voir Figure 5) mais l'amélioration de leur perception des variations d'intensité n'était pas significative (voir Figure 6). A l'inverse, l'entraînement en intensité a permis aux participants de diminuer leurs seuils perceptifs d'environ 0.3 dB, toujours après environ 5h d'apprentissage (voir Figure 6) mais l'amélioration de leur perception de la hauteur n'était pas significative (voir Figure 5). Cependant, on observe une tendance à l'amélioration des seuils de hauteur dans le groupe Intensité (voir Figure 5) alors que les seuils d'intensité restent stables pour le groupe Hauteur (voir Figure 6). Cette observation est intéressante car elle suggère que les effets ne sont pas tout à fait symétriques: l'entraînement sur la hauteur n'améliore pas la perception de l'intensité des sons mais l'entraînement sur l'intensité semble influencer la perception de la hauteur. Un point important sera de vérifier si cette tendance devient significative lorsque le nombre de participants prévus (16 dans chaque groupe) sera atteint. Les résultats finaux seront d'autant plus intéressants que pour le moment, l'analyse de corrélation entre les seuils obtenus dans les tâches de discrimination de hauteur et d'intensité ne révèle pas de

corrélation significative, ce qui indique que ces deux paramètres acoustiques sont plutôt traités indépendamment l'un de l'autre qu'en interaction.

Traitement pré-attentif des sons complexes

En accord avec nos hypothèses, les grandes variations de hauteur suscitent une MMN et une composante P3a plus amples que les variations de hauteur intermédiaires, elles-mêmes plus amples que les petites variations de hauteur (voir Figure 7). Cependant, concernant la MMN, il est important de noter que ces résultats sont obtenus sur l'amplitude moyenne calculée entre 170 et 250 ms après le début du stimulus et qu'ils sont influencés par des différences de latence de la MMN. En fait, la MMN associée aux Petits déviants est d'une amplitude équivalente à celle des Moyens déviants mais son maximum d'amplitude est plus tardif (voir Figure 7). En effet, les résultats de l'analyse de la latence du maximum d'amplitude de la MMN révèlent un effet principal significatif du facteur Déviant: les Petits déviants qui sont les plus difficiles à percevoir génèrent des MMNs de latence plus longue que les Grands et Moyens déviants en hauteur qui sont plus faciles à percevoir. Ces résultats vont dans le sens de ceux rapportés par Pakarinen et coll. (2007) qui ont mesuré la MMN associée à 6 déviants de hauteur plus ou moins facile à détecter. Ces auteurs ont montré que l'amplitude de la MMN augmente et que sa latence diminue avec l'augmentation de l'écart du déviant par rapport au standard. Enfin, notons que ces résultats montrent également que nos stimuli expérimentaux ont été bien construits.

Les résultats basés sur l'amplitude moyenne de la MMN (entre 170-250 ms après le début du stimulus) et de la composante P3a (entre 250-350 ms après le début du stimulus) montrent également que l'amplitude de la MMN est plus grande après qu'avant l'apprentissage dans les deux groupes de participants. Dans les deux cas, cette conclusion est confirmée par les résultats des analyses pour chaque déviant, centrées sur le maximum d'amplitude de la MMN et de la P3a (voir Figure 8). Ainsi, l'hypothèse selon laquelle l'entraînement devrait susciter une augmentation de la MMN et de la P3a après apprentissage, basée sur des résultats précédents notamment de Näätänen et collaborateurs (1993b), est vérifiée quel que soit le type de déviant, démontrant ainsi l'efficacité des apprentissages et mettant en évidence des effets de plasticité cérébrale rapide après seulement 5h d'apprentissage environ.

Enfin, l'hypothèse principale selon laquelle l'augmentation d'amplitude et la diminution de latence de la MMN après apprentissage devrait être plus grande dans le groupe Hauteur que dans le groupe Intensité est partiellement vérifiée. En effet, alors que l'interaction Groupe x Session n'est

pas significative sur l'amplitude moyenne de la MMN, elle est significative sur la latence de la MMN qui est plus courte en post qu'en pré-entraînement uniquement dans le groupe Hauteur. En outre, l'interaction Groupe x Session x Déviants est également significative sur la latence de la MMN : l'entraînement en hauteur est associé à une diminution de la latence de la MMN aux Petits déviants (différence Post-Pré significative dans le groupe Hauteur mais pas dans le groupe Intensité). L'analyse sur l'amplitude moyenne de la MMN réalisée pour chaque déviant séparément révèle également une augmentation d'amplitude uniquement dans le groupe Hauteur et uniquement pour les Petits déviants.

Il est intéressant de noter que les résultats des analyses de corrélations nous ont permis de mettre en évidence un lien entre l'amélioration des seuils perceptifs en hauteur après comparé à avant l'entraînement sur la perception de la hauteur des sons complexes et l'augmentation de l'amplitude et la diminution de la latence de la MMN générée par les petits déviants en hauteur. Ainsi, la diminution des seuils de hauteur avec l'entraînement prédit une meilleure détection pré-attentive de petites variations de hauteur des sons complexes. Ces résultats sont en accord avec plusieurs résultats de la littérature montrant que l'amplitude (e.g. Näätänen et coll., 1993b) et que la latence de la MMN (e.g. Pakarinen et coll., 2007) peuvent prédire la précision et la rapidité avec laquelle les participants détectent les variations de hauteur des stimuli au niveau pré-attentif.

Pris dans leur ensemble, et en accord avec nos hypothèses, ces résultats montrent une amélioration de l'efficacité du traitement pré-attentif de la hauteur après entraînement. De faibles écarts de hauteur (Petits déviants) par rapport à la trace standard sont mieux détectées (MMN) et attirent davantage l'attention de manière automatique (P3a) après un apprentissage centré sur la perception de la hauteur des sons complexes qu'après un apprentissage centré sur la perception de l'intensité. Ces résultats ne sont pas surprenants dans la mesure où les effets de l'apprentissage sont en général plus visibles lorsque les différences de hauteur sont plus difficiles à détecter (e.g. Schön et coll., 2004). Sur la base des résultats de la littérature (e.g. Kraus et Chandrasekaran, 2010) nous interprétons l'augmentation de l'amplitude moyenne de la MMN après apprentissage, comme une augmentation de la synchronisation des décharges des neurones impliqués dans la détection pré-attentive des variations de hauteur. Concernant la latence, l'amélioration de la rapidité du traitement après apprentissage pourrait refléter une décharge plus précoce des réseaux de neurones impliqués dans la perception de la hauteur.

Pour terminer cette section, il est important de noter que l'évolution du traitement pré-attentif des Petits déviant dans le groupe Hauteur n'est pas uniquement liée à une amélioration générale de

l'attention auditive car le groupe de contrôle entraîné sur l'intensité ne présente pas le même profil d'amélioration alors que l'apprentissage suivi conduisait également les participants de ce groupe à faire attention aux sons.

Traitement pré-attentif des syllabes

En accord avec les résultats de la littérature (e.g. Kaan et coll., 2007; Wang et coll., 2011), et comme pour les sons complexes, les grandes variations de hauteur des syllabes suscitent une MMN plus ample que des variations intermédiaires et petites (effet principal du facteur Déviant, voir Figure 14). Néanmoins, contrairement aux sons complexes, l'effet principal du facteur Session n'est pas significatif sur l'amplitude moyenne de la MMN entre 200-320 ms après le début du stimulus. Cependant, les analyses réalisées pour chaque déviant séparément révèlent que, dans les deux groupes de participants et pour les grands déviants uniquement, l'amplitude de la MMN était plus grande après qu'avant entraînement (voir Figure 15). Ces résultats sont intéressants car ils suggèrent que les effets de transfert d'apprentissage entre l'entraînement sur des sons complexes et la perception des syllabes ne sont visibles que pour les Grands déviants qui sont les plus faciles à détecter au niveau pré-attentif. Lorsque les variations de hauteur sur les syllabes sont plus difficiles à détecter au niveau pré-attentif, les effets de transfert d'apprentissage ne sont pas significatifs. Toutefois, il est important de noter que l'observation des tracés ne montre pas de MMN pour les Petits déviants, ce qui laisse penser que les participants n'ont pas perçu la différence de hauteur entre les Petits déviants et la syllabe standard (voir Figure 15). En fait, l'analyse des tracés individuels montre que les Moyens et Petits déviants génèrent une MMN uniquement pour cinq participants, suggérant que ces déviants sont en moyenne trop difficiles à détecter au niveau pré-attentif. Si ces résultats sont confirmés sur un plus grand nombre de participants, il sera intéressant de déterminer si les effets de transfert d'apprentissage dépendent effectivement de la différence entre le stimulus déviant et le stimulus standard. En outre, le fait que les résultats basés sur l'amplitude moyenne de la MMN soient similaires dans les deux groupes de participants entraînés en hauteur ou en intensité suggère que l'effet de transfert d'apprentissage observé pour les Grands déviants en hauteur est plutôt lié à un effet général d'amélioration de l'attention auditive (entraînée dans les deux groupes) qu'à un effet spécifique de l'entraînement sur la hauteur.

Les résultats basés sur l'analyse de la latence du maximum d'amplitude de la MMN associée aux grands déviants en hauteur conduisent à une interprétation différente. En effet, la latence de la MMN associée aux grands déviants en hauteur est plus courte uniquement après un entraînement sur la perception de la hauteur des sons complexes mais pas après un entraînement sur la perception de

l'intensité des sons. Ces résultats suggèrent qu'un entraînement permettant de détecter des différences de hauteur de plus en plus petites sur des sons complexes aide à la détection de variations de hauteur sur des syllabes et que l'effet de transfert d'apprentissage est spécifique au paramètre entraîné.

Pris dans leur ensemble, les résultats obtenus montrent des effets de transfert d'apprentissage d'un entraînement de la perception des sons complexes vers la perception des grandes variations de hauteur des syllabes au niveau pré-attentif. Cependant, l'effet de transfert d'apprentissage sur la latence de la MMN est spécifique au groupe entraîné sur la hauteur alors que l'effet de transfert sur l'amplitude de la MMN est trouvé dans les deux groupes, reflétant probablement un effet général de l'amélioration de l'attention auditive après entraînement. Encore une fois, ces résultats doivent être confirmés sur un plus grand nombre de participants avant de pouvoir conclure sur les effets de transfert d'apprentissage qui sont au centre de ce travail.

Remarques générales, limitations et perspectives

L'inspection visuelle des tracés montre qu'avant l'entraînement, la MMN associée aux sons complexes et aux syllabes semble plus ample dans le groupe Intensité que dans le groupe Hauteur (voir Figure 7). L'analyse des données individuelles montre que, malgré une répartition des participants faite au hasard, quatre participants assignés à l'entraînement d'intensité présentaient des MMNs particulièrement amples. Il est possible que ces différences disparaissent avec un plus grand nombre de participants. Cependant, ces différences entre groupes avant entraînement ont pu masquer ou diminuer artificiellement les effets liés à l'entraînement.

Il est intéressant de noter que pour des variations de hauteur similaires, la MMN associée aux sons complexes ($-1.3 \mu V$ en moyenne) est plus ample que celle associée aux syllabes ($-0.3 \mu V$ en moyenne). De même, la latence moyenne de la MMN mesurée pour les Grand déviants est plus précoce pour les sons complexes (206 ms en moyenne) que pour les syllabes (293 ms en moyenne). Ces différences sont probablement liées au fait que le début des sons complexes est plus abrupt et leur fréquence plus stable que celle des syllabes (Astésano et coll., 2004).

La variance observée sur les seuils moyens de hauteur diminue clairement après entraînement uniquement dans le groupe Hauteur (Figure 5) ce qui suggère que les participants ont un niveau de perception variable avant l'apprentissage, mais que l'entraînement sur la hauteur uniformise leur niveau de performance. Cet effet est également observée sur la latence de la MMN associée au Moyen et Petit déviant (voir Figure 10): la variance diminue après entraînement uniquement dans le

groupe Hauteur. Cet effet pourrait refléter une décharge plus rapide et plus homogène des neurones, spécifique à l'entraînement sur la hauteur.

Les analyses que j'ai réalisées sont centrées sur l'électrode située sur la région frontale (Fz) car c'est là où les effets sont généralement les plus amples (Näätänen et coll., 1993a). Cependant, de nouvelles analyses seront réalisées qui incluront un plus grand nombre d'électrodes lorsque tous les participants prévus auront été testés. Ainsi, les ANOVAs comprendront les facteurs Région d'Intérêt (régions frontales vs centrales vs pariétales) et Latéralité (gauche vs ligne médiane vs droite) afin d'étudier la distribution topographique des phénomènes enregistrés sur le scalp.

Concernant les perspectives, Näätänen et coll. (2011a) suggèrent que l'enregistrement de la MMN pourrait avoir de potentielles applications cliniques en tant qu'outil de mesure objectif d'une diminution de la perception auditive. Par exemple, les maladies neurodégénératives telles que la maladie de Parkinson, d'Alzheimer ou des troubles psychiatriques tels que la schizophrénie ont en commun l'apparition d'un déficit de discrimination auditive qui peut avoir des conséquences au niveau cognitif. Plus spécifiquement, ce déficit pourrait être lié à une détérioration fonctionnelle des réseaux auditifs cortico-frontaux qui participeraient à la génération de la MMN. En outre, l'enregistrement de la MMN ne nécessite pas que l'attention soit focalisée sur le stimulus ce qui présente un sérieux avantage pour tester des patients.

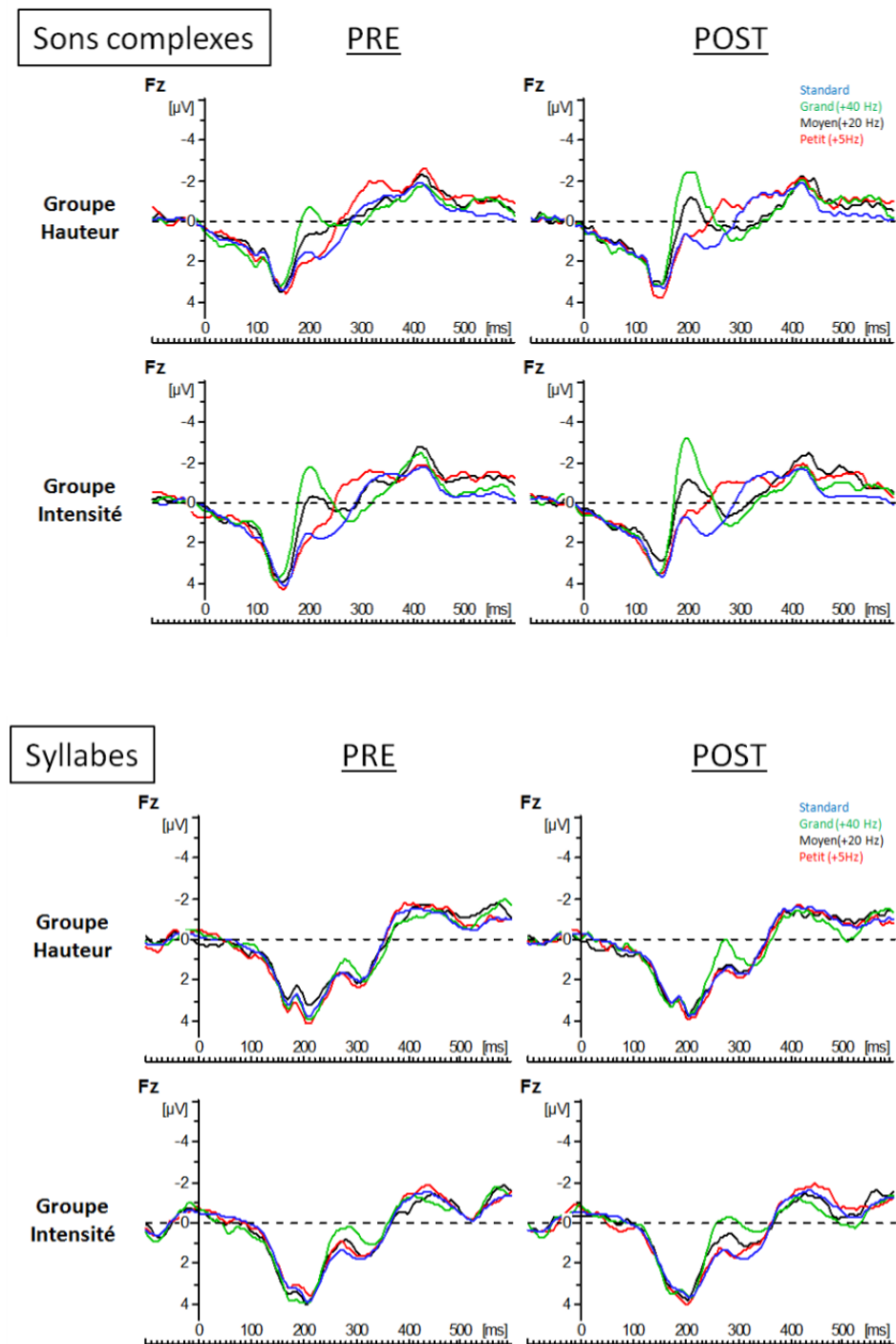
Une autre perspective est basée sur les résultats de nombreux travaux montrant que l'apprentissage musical peut être bénéfique d'un point de vue éducatif, par exemple dans le cadre de l'apprentissage d'une nouvelle langue (revue Chobert et Besson, 2013) ou encore pour des enfants présentant des troubles d'apprentissage tels que la dyslexie (Habib et coll., 2016). La dyslexie est un trouble d'apprentissage de la lecture, souvent lié à un déficit de perception des phonèmes. Baldeweg et collaborateur (1999) ont notamment montré que la discrimination pré-attentive de la hauteur des sons était déficitaire chez les enfants dyslexiques et que ce déficit était corrélé à l'atteinte des capacités phonologiques de ces enfants. Un apprentissage psycho-acoustique pourrait potentiellement être un complément thérapeutique dans la prise en charge de ce trouble.

REFERENCES

- Astesano, C., Besson, M. & K. Alter. (2004). Brain potentials during semantic and prosodic processing in French. *Cognitive Brain Research*, 18, 172-184.
- Baldeweg T., Richardson A., Watkins S., Foale C., Gruzelier J. (1999). Impaired frequency discrimination in dyslexia detected with mismatch evoked potentials. *Ann Neurol.*, 45:495–503.
- Besson, M., Chobert, J., & Marie, C. (2011). Transfer of training between music and speech: Common processing, attention, and memory. *Frontiers in Psychology*, 2, 94.
- Besson, M., Barbaroux, M. & Dittinger, E.(in press). “Music in the brain: Music and language processing”. In “The routledge companion to music perception”, Eds R. Ashley and R. Timmers, Taylor and Francis group).
- Brickenkamp, R., Schmidt-Atzert, L., Liepmann D. (2010). Test d2-R – Revision. Aufmerksamkeits- und Konzentrationstest [Test d2-R – Revision: attention and concentration test]. Göttingen: Hogrefe.
- Cardebat, D., Doyon, B., Puel, M., Goulet, P., Joannette, Y. (1990). Formal and semantic lexical evocation in normal subjects. Performance and dynamics of production as a function of sex, age and educational level. *Acta Neurol Belg*, 90(4):207-17.
- Chandrasekaran, B., Krishnan, A., Gandour, J. T. (2009). Relative influence of musical and linguistic experience on early cortical processing of pitch contours. *Brain Lang.* 108, 1–910.1016.
- Chobert, J., Besson, M. (2013). Musical expertise and second language learning. *Brain Sci.* 3, 923–940.
- Cooper, A., and Wang, Y. (2012). The influence of linguistic and musical experience on Cantonese word learning. *J. Acoust. Soc. Am.*, Jun;131(6):4756-69.
- Dawson, G. D. (1954). A summation technique for the detection of small evoked potentials. *Electroencephalography and clinical neurophysiology*, 6, 65-84.
- Dittinger, E., Barbaroux, M., D’Imperio, M., Jäncke, L., Elmer, S., & Besson, M. (2016). Professional music training and novel word learning: from faster semantic encoding to longer-lasting word representations. *Journal of Cognitive Neuroscience* 28:10, pp. 1584–1602.
- Dittinger, E., Chobert, J., Ziegler, J. C., Besson, M. (2017). Fast brain plasticity during word learning in musically trained children. *Frontiers in Human Neuroscience, Frontiers*, 9, pp.585 - 585.
- George, E. M., and Coch, D. (2011). Music training and working memory: an ERP study. *Neuropsychologia* 49, 1083–1094.
- Habib, M., Lardy, C., Desiles, T., Commeiras, C., Chobert, J., Besson, M. (2016). Music and dyslexia: a new musical training method to improve reading and related disorders. *Front. Psychol.* 7:26.
- Jasper, H.H. (1958). The ten-twenty electrode system of the International Federation, *Electroenceph. clin. Neurophysiol.*, 10: 371-375.
- Kaan, E., Wayland, R., Bao, M., & Barkley, C. (2007). Effects of native language and training on lexical tone perception: An event-related potential study. *Brain Res.*, 1148, 113-122.
- Koelsch, S., Schroger, E. & Tervaniemi, M. (1999). Superior pre-attentive auditory processing in musicians. *Neuroreport* 10, 1309–1313.
- Korkman, M., Kirk, U., and Kemp, S. (2012). NEPSY II - Bilan Neuropsychologique de l’Enfant, 2de Édn. Adaptation française Paris: Editions ECPA.
- Kraus, N., and Chandrasekaran, B. (2010). Music training for the development of auditory skills. *Nat. Rev. Neurosci.* 11, 599–605.
- Kutas, M., & Hillyard, S. A. (1980). Reading senseless sentences: Brain potentials reflect semantic incongruity. *Science*, 207(4427), 203-205.

- Marie, C., Kujala, T., Besson, M. (2012).** Musical and linguistic expertise influence pre-attentive and attentive processing of non-speech sounds. *Cortex* 48, 447–457.
- Micheyl, C., Delhommeau, K., Perrot, X. and Oxenham, A.J. (2006).** Influence of musical and psychoacoustical training on pitch discrimination. *Hearing Research* 219 37–46.
- Miyake, A., Friedman, N. P., Emerson, M. J., Witzki, A. H., Howerter, A., & Wager, T. D. (2000).** The unity and diversity of executive functions and their contributions to complex “Frontal Lobe” tasks: A latent variable analysis. *Cognitive Psychology* , 41 (1), 49–100.
- Moradzadeh L., Blumenthal G., Wiseheart M. (2014).** Musical training, bilingualism, and executive function: a closer look at task switching and dual-task performance. *Cogn. Sci.* 38 1–29.
- Näätänen, R. Gaillard, A.W.K., & Mantysalo, S. (1978).** Early selective-attention effect on evoked potential reinterpreted. *Acta Psychologica*, 42, 313–329.
- Näätänen, R., Paavilainen, P., Tiitinen, H., Jiang, D., Alho, K. (1993a).** Attention and mismatch negativity. *Psychophysiology*; 30:436–50.
- Näätänen, R., Schröger, E., Karakas, S., Tervaniemi, M., Paavilainen, P. (1993b).** Development of a memory trace for a complex sound in the human brain. *NeuroReport*;4:503–6.
- Näätänen, R., Paavilainen, P., Rinne, T., Alho, K. (2007).** The mismatch negativity (MMN) in basic research of central auditory processing: a review. *Clin Neurophysiol*;118: 2544–90.
- Näätänen, R., Kujala, T., Kreegipuu, K., Carlson, S., Escera, C., Baldeweg, T., Ponton, C. (2011a).** The mismatch negativity: an index of cognitive decline in neuropsychiatric and neurological diseases and in ageing. *Brain*; 134: 3435–3453.
- Pakarinen, S., Takegata, R., Rinne, T., Huottilainen, M., Näätänen, R. (2007).** Measurement of extensive auditory discrimination profiles using mismatch negativity (MMN) of the auditory event-related potential. *Clinical Neurophysiology*; 118: 177–185.
- Peretz, I., Champod, S., Hyde, K. (2003).** Varieties of Musical Disorders : The Montreal Battery of Evaluation of Amusia. *Ann N Y AcadSci* ; 999 : 58-75.
- Schön, D., Magne, C., Besson, M. (2004).** The music of speech: music training facilitates pitch processing in both music and language. *Psychophysiology* 41, 341–349.
- Strait, D. L., Kraus, N., Parbery-Clark, A., and Ashley, R. (2010).** Musical experience shapes top-down auditory mechanisms: evidence from masking and auditory attention performance. *Hear. Res.* 261, 22–29.
- Sutton, S., Braren, M., Zubin, J., John, E.. (1965).** Evoked potential correlates of stimulus uncertainty. *Science*; 150 : 1187-8.
- Wang, Y., Yang Zhang, Angela Cooper and Mathieu Dovan. (2011).** Effects of training on the processing of speech and non-speech tone: An event-related potential study. *Proceedings of the Psycholinguistic Representation of Tone Conference*, Hong Kong, August 22-23.
- Wechsler, D. (1997).** Wechsler Adult Intelligence Scale– Third Edition. San Antonio: The Psychological Corporation.

ANNEXES



Annexe1: Potentiels évoqués enregistrés sur l'électrode Fz avant (PRE) et après entraînement (POST) pour les deux groupes de participants. Les tracés illustrent les réponses générées par les sons complexes et les syllabes. (le stimulus standard en bleu, les petits déviants en rouge, les moyen déviant en noir et les grands déviants en vert).

Effets	Seuil Hauteur	Seuil Intensité
Groupe	F<1	F<1
Session	F(1,21)= 14.4, p=.001	F(1,21)= 8.6, p=.008
Groupe x Session	F(1,21)= 4.35, p=.05	F(1,21)= 3.7, p=.07

Annexe 2: Résultats de l'ANOVA sur les seuils psycho-acoustiques mesurés pour les sons complexes.

Effets	Amplitude moyenne MMN	Amplitude moyenne P3a	Latence MMN
<i>SONS COMPLEXES</i>			
Groupe	F(1,21)= 2.06; p=.17	F<1	F(1,21)= 6.21; p=.02
Session	F(1,21)= 6.12 ;p=.02	F(1,21)= 6.73; p=.02	F(1,21)= 24.33; p=.001
Déviant	F(1,21)= 33.49 ;p=.001	F(1,21)= 42.78; p=.001	F(1,21)= 51.42; p=.001
Groupe x Session	F<1	F<1	F(1,21)= 7.42; p=.01
Groupe x Déviant	F<1	F<1	F(1,21)= 2.53; p=.09
Session x Déviant	F<1	F(1,21)= 1.43, p=0.25	F(1,21)= 5.48; p=.007
Session x Déviant x Groupe	F<1	F<1	F(2,42)= 3.56; p=.04
<i>SYLLABES</i>			
Groupe	F(1,21)=4.43; p=.05	F(1,21)= 3.06, p=.09	
Session	F(1,21)=2.16 ; p=.16	F<1	
Déviant	F(1,21)=12.9 ; p=.001	F(1,21)= 1.19, p=.31	
Groupe x Session	F<1	F<1	
Groupe x Déviant	F<1	F(1,21)= 3.44, p=.04	
Session x Déviant	F(1,21)= 2.20; p=.12	F<1	
Session x Déviant x Groupe	F(1,21)= 1.12; p=.34	F<1	

Annexe 3: Résultats des ANOVAs générales sur la MMN enregistrée sur l'électrode Fz pour les sons complexes et les syllabes.

Déviant	Effets	Amplitude moyenne MMN	Amplitude moyenne P3a	Latence MMN
<i>SONS COMPLEXES</i>				
Grand	Groupe	F(1,21)= 1.16; p=.29	F<1	
	Session	F(1,21)= 4.39; p=.05	F(1,21)= 4.54; p=.04	
	Groupe x Session	F<1	F<1	
Moyen	Groupe	F<1	F<1	
	Session	F(1,21)= 3.46; p=.08	F(1,21)= 28.94; p=.001	
	Groupe x Session	F<1	F<1	
Petit	Groupe	F(1,21)= 2.59; p=.12	F(1,21)= 9.15; p=.007	
	Session	F(1,21)= 6.09; p=.02	F(1,21)= 6.06; p=.02	
	Groupe x Session	F(1,21)= 3.68; p=.07	F(1,21)= 1.20; p=.29	
<i>SYLLABES</i>				
Grand	Groupe	F(1,21)= 23.90; p=.36	F(1,21)= 2.39; p=.14	F(1,21)= 5.11, p=.03
	Session	F(1,21)= 5.11; p=.03	F<1	F(1,21)=1.80, p=.19
	Groupe x Session	F<1	F(1,21)= 2.01; p=.17	F(1,21)= 4.96, p=.04
Moyen	Groupe	F<1	F<1	F(1,21)= 1.41, p=.25
	Session	F<1	F<1	F<1
	Groupe x Session	F<1	F(1,21)= 1.61; p=.22	F<1
Petit	Groupe	F<1	F<1	
	Session	F<1	F(1,21)= 1.02; p=.32	
	Groupe x Session	F<1	F<1	

Annexe 4: Résultats des analyses statistiques séparées pour chaque déviant sur les amplitudes moyennes de la MMN et la P3a enregistrées sur l'électrode Fz pour les sons complexes et les syllabes.

Déviant Groupe		Sons complexes		Syllabes	
		MMN	P3a	MMN	P3a
Tous		170-250	250-350	200-320	320-400
Grand	GH	PRE 200-220 POST 190-210	310-330	260-280	350-370
	GI	190-210	310-330		380-400
Moyen	GH	PRE 235-255 POST 220-240	310-330	210-230	360-380
	GI	PRE 205-225 POST 200-220	310-330	270-290	
Petit	GH	PRE 280-300 POST 250-270	310-330	270-290	360-380
	GI	250-270	350-370		

Annexe 5: Rangs de latence choisis pour l'analyse des amplitudes moyennes (ms):

Groupe Hauteur (GH), groupe Intensité (GI).

Session	Groupe Hauteur		Groupe Intensité	
	PRE	POST	PRE	POST
Grand déviant	212 $\Delta=12$	200	205 $\Delta=1$	204
Moyen déviant	245 $\Delta=32$	213	230 $\Delta=20$	210
Petit déviant	341 $\Delta=81$	260	272 $\Delta=14$	258

Annexe 6: Latences moyennes de la MMN (ms) enregistrée sur l'électrode Fz;

Δ : Delta Pré-entraînement - Post-entraînement.

Session	Groupe Hauteur		Groupe Intensité	
	PRE	POST	PRE	POST
Grand déviant	300 $\Delta=27$	273	296 $\Delta=-7$	303

Annexe 7: Latences moyennes de la MMN (ms) enregistrée pour le Grand déviant sur l'électrode Fz;

Δ : Delta Pré-entraînement - Post-entraînement.

RESUME

La musique et le langage sont des signaux auditifs qui reposent sur des paramètres acoustiques communs, la hauteur, l'intensité, la durée et le timbre. Les musiciens professionnels sont plus sensibles aux variations de ces paramètres et ils sont avantagés non seulement dans des tâches musicales mais aussi dans des tâches de catégorisation de syllabes. Plus étonnant, l'expertise musicale influence l'apprentissage du sens de nouveaux mots. Il s'agit d'un effet positif de transfert d'apprentissage entre la pratique soutenue d'un instrument de musique et les capacités langagières.

Mon travail s'intègre dans une étude qui a pour objectif de tester l'hypothèse selon laquelle le développement d'une « oreille musicale » peut expliquer les meilleurs niveaux de performances des musiciens dans certaines tâches linguistiques. En effectuant une étude longitudinale, on veut tester l'effet causal d'un entraînement auditif à différents niveaux du langage, notamment ici au niveau pré-attentif.

Les objectifs de l'expérience étaient doubles : 1) étudier l'effet d'un entraînement basé sur une méthode psycho-physique sur la perception de sons harmoniques complexes au niveau pré-attentif grâce à l'enregistrement des potentiels évoqués et l'analyse de la Négativité de Discordance (Mismatch Negativity ou MMN) et 2) tester un potentiel transfert d'apprentissage vers les syllabes dans les mêmes conditions. Deux groupes de participants ont suivi un entraînement qui avait pour but d'améliorer la perception de la hauteur (groupe expérimental) ou de l'intensité des sons (groupe de contrôle). Selon notre hypothèse principale, l'apprentissage en hauteur devait permettre à la fois d'améliorer les capacités de discrimination pré-attentive des sons harmoniques et des syllabes variants en hauteur.

Sur la base des premiers résultats, qui doivent être complétés par la suite, nous avons pu vérifier que les entraînements ont été efficaces en permettant aux participants d'améliorer leurs capacités de discrimination des variations acoustiques fines à la fois au niveau comportemental et électrophysiologique. De faibles variations de hauteur (Petits déviants) sont mieux détectées au niveau pré-attentif (augmentation d'amplitude et diminution de latence de la MMN) après un apprentissage centré sur la perception de la hauteur, que sur la perception de l'intensité, des sons complexes. Cette amélioration de la perception de la hauteur est positivement corrélée à l'amplitude et à la latence de la MMN associée aux petites variations de hauteur des sons complexes. Enfin, les résultats montrent un effet de transfert d'apprentissage de la perception des sons complexes vers la perception des grandes variations de hauteur des syllabes au niveau pré-attentif.

Ainsi, les résultats sont en accord avec l'hypothèse qu'un entraînement perceptif pertinent facilite la perception de certains aspects du langage ce qui pourrait avoir des implications sociétales en aidant, par exemple, à la remédiation des troubles du langage rencontrés chez les enfants « dys ».