

Université de Montréal

**Excitabilité du système miroir : une étude de stimulation  
magnétique transcrânienne sur le chant et le langage**

par

Isabelle Royal

Département de psychologie

Faculté des arts et des sciences

Mémoire présenté à la Faculté des arts et des sciences  
en vue de l'obtention du grade de Maîtrise  
en psychologie

septembre, 2012

© Isabelle Royal, 2012

## Résumé

La perception de mouvements est associée à une augmentation de l'excitabilité du cortex moteur humain. Ce système appelé « miroir » sous-tendrait notre habileté à comprendre les gestes posés par une tierce personne puisqu'il est impliqué dans la reconnaissance, la compréhension et l'imitation de ces gestes. Dans cette étude, nous examinons de quelle façon ce système miroir s'implique et se latéralise dans la perception du chant et de la parole. Une stimulation magnétique transcrânienne (TMS) à impulsion unique a été appliquée sur la représentation de la bouche du cortex moteur de 11 participants. La réponse motrice engendrée a été mesurée sous la forme de potentiels évoqués moteurs (PÉMs), enregistrés à partir du muscle de la bouche. Ceux-ci ont été comparés lors de la perception de chant et de parole, dans chaque hémisphère cérébral. Afin d'examiner l'activation de ce système moteur dans le temps, les impulsions de la TMS ont été envoyées aléatoirement à l'intérieur de 7 fenêtres temporelles (500-3500 ms). Les stimuli pour la tâche de perception du chant correspondaient à des vidéos de 4 secondes dans lesquelles une chanteuse produisait un intervalle ascendant de deux notes que les participants devaient juger comme correspondant ou non à un intervalle écrit. Pour la tâche de perception de la parole, les participants regardaient des vidéos de 4 secondes montrant une personne expliquant un proverbe et devaient juger si cette explication correspondait bien à un proverbe écrit. Les résultats de cette étude montrent que les amplitudes des PÉMs recueillis dans la tâche de perception de chant étaient plus grandes après stimulation de l'hémisphère droit que de l'hémisphère gauche, surtout lorsque l'impulsion était envoyée entre 1000 et 1500 ms. Aucun effet significatif n'est ressorti de la condition de perception de la parole. Ces résultats suggèrent que le système miroir de l'hémisphère droit s'active davantage après une présentation motrice audio-visuelle, en comparaison de l'hémisphère gauche.

**Mots-clés** : Système miroir, TMS, cortex moteur, chant, parole, latéralisation.

## **Abstract**

The perception of movements is associated with increased activity in the human motor cortex. This system underlies our ability to understand one's actions, as it is implicated in the recognition, understanding and imitation of actions. In this study, we investigated the involvement and lateralization of this "mirror neuron" system (MNS) in the perception of singing and speech. Transcranial magnetic stimulation (TMS) was applied over the mouth representation of the motor cortex in 11 participants. The generated motor response was measured in the form of motor evoked potentials (MEPs), recorded from the mouth muscle. The MEPs were compared for the singing and speech conditions in each cerebral hemisphere. Furthermore, to investigate the time course of the MNS activation, TMS pulses were randomly emitted in 7 time windows (ranging from 500 to 3500 milliseconds after stimulus onset). The stimuli for the singing condition consisted in 4-second videos of singers producing a 2-note ascending interval. Participants had to judge whether the sung interval matched a written interval, previously presented on the screen. For the speech condition, 4-second videos of a person explaining a proverb were shown. Participants had to decide whether this explanation matched a written proverb previously displayed on the screen. Results show that the MEP amplitudes were higher after stimulation of the right hemisphere in the singing condition. More specifically, sending TMS pulses between 1000 and 1500 milliseconds over the right hemisphere yielded higher MEPs as compared to the left hemisphere. No effect was found in the speech condition. These results suggest that the right MNS is more activated after an audiovisual motor presentation compared to the left hemisphere.

**Keywords** : Mirror neuron system, TMS, motor cortex, singing, speech, lateralization.

# Table des matières

<b>Résumé .....</b>	<b>i</b>
<b>Abstract .....</b>	<b>ii</b>
<b>Liste des tableaux .....</b>	<b>iv</b>
<b>Liste des figures.....</b>	<b>v</b>
<b>Liste des abréviations .....</b>	<b>vi</b>
<b>Remerciements.....</b>	<b>vii</b>
<b>1. Introduction .....</b>	<b>1</b>
<b>1.1 Système miroir .....</b>	<b>1</b>
<b>1.2 Stimulation magnétique transcrânienne.....</b>	<b>4</b>
<b>1.3 Musique et langage dans le cortex moteur .....</b>	<b>5</b>
<b>1.4 Objectifs et hypothèses.....</b>	<b>7</b>
<b>2. Excitabilité du système miroir dans la parole et le chant .....</b>	<b>9</b>
<b>2.1 Méthode .....</b>	<b>9</b>
Participants .....	9
Préparation des participants et acquisition des PÉMs .....	10
Stimulation magnétique transcrânienne.....	12
Tâches et procédure .....	12
Analyses des données et normalisation.....	17
<b>2.2 Résultats .....</b>	<b>18</b>
Données comportementales .....	18
Potentiels évoqués moteurs.....	19
<b>Discussion .....</b>	<b>23</b>
<b>Bibliographie.....</b>	<b>30</b>
<b>Annexe 1 .....</b>	<b>viii</b>
<b>Annexe 2 .....</b>	<b>x</b>

## Liste des tableaux

Tableau I. Description des participants.....	10
Tableau II. Résumé de la procédure expérimentale.....	13

## Liste des figures

Figure 1. Régions d'intérêt sur le cortex moteur.....	11
Figure 2. Exemple des stimuli utilisés dans les conditions de base et dans les tâches.....	14
Figure 3. Déroulement de la tâche de perception de la parole.....	15
Figure 4. Déroulement de la tâche de perception du chant.....	16
Figure 5. Progression temporelle de la vidéo de chant.....	16
Figure 6. Exemples de PÉMs sur l'orbicularis oris et le premier dorsal interosseux.....	17
Figure 7. Amplitudes des PÉMs normalisés pour la condition de parole.....	20
Figure 8. Amplitudes des PÉMs normalisés pour la condition de chant.....	21

## Liste des abréviations

IRMf : Imagerie par résonance magnétique fonctionnelle

MNS : Mirror neuron system

PÉM : Potentiel évoqué moteur

TMS : Stimulation magnétique transcrânienne

## Remerciements

Je tiens d'abord à remercier chaleureusement ma superviseure, Isabelle Peretz, pour ses conseils, ses encouragements continus et son support constant au cours des trois dernières années. C'est pour moi un privilège d'être membre du BRAMS et de faire partie d'un laboratoire qui me permet de contribuer à l'avancement de la recherche en neuropsychologie de la musique.

Je remercie également Pascale Lidji, qui m'a guidée à travers la réalisation de ma maîtrise et qui a su, grâce à sa patience et sa disponibilité, à la fois m'enseigner, me motiver et me guider.

L'accomplissement de cette étude et de ce mémoire n'aurait pas été possible sans la présence de mes collègues du BRAMS. Parmi eux, je souligne l'implication de Mihaela Felezeu pour sa participation à la collecte de données et son infinie patience dans l'exploration du cortex moteur et Nathanaël Couture-Lecaudé, Olivier Piché et Bernard Bouchard pour leur support technique et leur efficacité à résoudre les problèmes informatiques. Je mentionne aussi Sébastien Paquette, Geneviève Mignault-Goulet, Nicolas Robitaille, Marion Cousineau, Kathrin Rothermich et Patrice Voss qui, en plus de leur amitié, m'ont offert leur temps, expérience et expertise, et qui ont joué un rôle clef dans mon apprentissage.

Je souligne l'aide précieuse d'Hugo Théoret, en particulier pour ses informations et conseils techniques qui nous ont permis de démarrer cette étude.

Finalement, je remercie infiniment ma famille, Pierre Royal, Marie Lupien, Geneviève Royal et Jocelyne Lupien pour leurs encouragements et leur curiosité, mais aussi pour leur confiance en moi et leur implication dans mes études et dans l'atteinte de mes objectifs.



# 1. Introduction

Le cerveau humain agit comme un miroir : *voir* une personne parler ou chanter activerait les régions du cerveau qui sont aussi responsables de la *production* du langage ou du chant. Observer ou exécuter une action serait lié à la même activation cérébrale. C'est grâce à cette boucle sensorimotrice que l'apprentissage est possible, puisqu'elle nous permet à la fois de percevoir un mouvement, de le reconnaître et de savoir comment faire pour l'imiter (Umiltà et al., 2001; Rizzolatti, Fogassi & Gallese, 2001; Watkins, Strafella & Paus, 2003). C'est aussi grâce à ce mécanisme impliquant à la fois la perception et la production que nous pouvons comprendre la signification et l'intention d'un geste posé par une tierce personne puisque nous savons comment nous nous sentons nous-même suite à l'exécution de ce geste (Gallese, Keysers & Rizzolatti, 2004; Kohler et al. 2002). Ce système, primordial à nos apprentissages et notre vie sociale, a été maintes fois étudié chez les primates comme chez l'humain.

Dans la présente étude, nous explorerons comment ce système miroir est impliqué et latéralisé dans la perception du chant et de la parole, par le biais de la stimulation magnétique transcrânienne (TMS).

## 1.1 Système miroir

Une même sous-population de neurones serait impliquée dans l'observation et l'exécution d'une action (Rizzolatti et al., 1988; di Pellegrino, Fadiga, Fogassi, Gallese & Rizzolatti, 1992; Rizzolatti, Fadiga, Gallese & Fogassi, 1996; Rizzolatti & Craighero, 2004). Ces neurones, appelés « neurones miroirs » ont été directement investigués dans le cortex ventral prémoteur (F5) chez le primate, région homologue à l'aire de Broca chez l'humain pouvant être à l'origine de l'évolution du langage (Rizzolatti et al., 1988; di Pellegrino et al., 1992; Fadiga, Fogassi, Pavesi & Rizzolatti, 1995; Gallese, Fadiga, Fogassi & Rizzolatti, 1996; Kohler et al, 2002). L'existence d'un tel système neuronal indiquerait que lorsqu'une action dirigée est observée (ex. un singe prend une banane), le cerveau permet non seulement la perception de ce mouvement, mais aussi le retrait automatique de

l'information motrice associée à l'exécution de ce mouvement particulier (i.e. je peux prendre une banane en positionnant ma main de cette façon) (Fadiga et al., 1995).

Des études IRMf soutiennent l'existence de ce système d'observation et exécution partagé chez l'humain, en mettant en évidence une activation similaire des régions motrices durant la perception visuelle et l'exécution d'un même mouvement (Iacoboni et al., 1999; Buccino et al., 2001). Par exemple, Iacoboni et ses collègues (1999) ont trouvé qu'exécuter et observer le même mouvement de la main engendrait des patrons d'activité corticale similaires dans l'aire 44 (operculum frontal gauche), l'homologue humain du cortex ventral prémoteur chez le singe. Ces résultats suggèrent la présence d'un système miroir humain, semblable à celui directement investigué chez le primate.

En plus de la modalité visuelle, le système miroir se comporte de façon semblable dans la modalité auditive en s'activant tout autant lorsqu'une action est observée que lorsque le bruit qui lui est associé est entendu (Kholer et al., 2002, Keysers et al., 2003). À cet effet, Kholer et al. (2002) ont étudié la réaction de macaques lorsqu'ils observaient et entendaient ou entendaient seulement une feuille de papier se faire déchirer. L'activité, enregistrée directement dans le cortex ventral prémoteur, était la même que la feuille de papier soit visible ou cachée de la vue du singe.

L'existence de ce système miroir chez l'humain est aussi supportée par des études impliquant la perception de mouvements reliés au langage. Dans leur théorie motrice de la perception de la parole, Liberman et Mattingly (1985) prédisent que la perception de la parole implique un accès direct au système de production de la parole. Cette théorie est supportée par les résultats obtenus par Watkins et al. (2003) dans une étude portant sur la perception du langage. Ils ont trouvé que prêter attention à des stimuli auditifs ou visuels liés au langage génère une plus grande activité du cortex moteur qu'une condition contrôle (bruit blanc et bruit visuel) et que cet effet était latéralisé, c'est-à-dire que l'activité était plus grande après la stimulation de l'hémisphère gauche, sous-tendant typiquement le traitement du langage, comparativement à l'hémisphère droit.

Il est intéressant de noter que dans l'étude de Watkins et al. (2003), l'activité enregistrée durant l'observation visuelle uniquement de mouvements labiaux étaient plus grande lorsqu'ils étaient enregistrés par des électrodes placées sur un muscle de la bouche (*orbicularis oris*) des participants que lorsque les électrodes étaient placées sur un muscle de leurs mains (*premier dorsal interosseux*) (Watkins et al., 2003; Strafella & Paus, 2000). Ces résultats permettent de supposer que le système miroir est spécifique puisqu'il est excité par la perception des muscles nécessaires à l'exécution d'un mouvement (Strafella & Paus, 2000). De façon congruente, d'Ausilio et al. (2009) ont observé une double dissociation des structures du cortex moteur impliquées dans la discrimination du langage au niveau des lèvres et de la langue. L'activité mesurée sur les lèvres était plus grande que celle mesurée sur la langue pour la perception de la parole impliquant principalement un mouvement des lèvres (perception de l'articulation des lettres « b » et « p »), et l'activité mesurée sur la langue était plus grande que celle mesurée sur les lèvres pour la perception de parole impliquant principalement un mouvement de la langue (perception de l'articulation des lettres « t » et « d »).

Bien que certains neurones miroir du cortex moteur aient une préférence pour une modalité, il a été proposé que les stimuli jumelant les modalités visuelle et auditive sont les plus riches en information (McGurk & MacDonald, 1974; Quinto, Thompson, Russo & Trehub, 2010). Par exemple, Jesse et Massaro (2010) ont trouvé que des participants étaient capables d'identifier beaucoup plus de mots ou de paroles de chansons lorsqu'ils pouvaient voir le visage et entendre la personne qui parle ou chante que lorsqu'ils avaient accès uniquement au contenu auditif ou visuel. Toutefois, dans une étude menée par Thompson et Russo (2007), il a été montré que des participants pouvaient déduire une partie de l'information auditive par le biais de stimuli visuels. Leurs participants devaient identifier des intervalles musicaux à partir de stimuli visuels uniquement. Les résultats ont montré que l'ouverture des lèvres et la position de la mâchoire prédisait la hauteur tonale; c'est-à-dire que moins d'ouverture correspondait à un intervalle musical plus petit, et plus d'ouverture à un intervalle musical plus grand.

En somme, le système miroir, directement investigué chez le primate et identifié chez l'humain grâce à des études en imagerie, serait activé de façon semblable par la perception et l'exécution d'une même action. Certains neurones le composant auraient aussi une préférence pour une modalité (visuelle ou auditive par exemple) ou une partie du corps (la bouche ou la langue par exemple). Toutefois, les stimuli les plus riches, et donc susceptibles d'activer un maximum de neurones du système miroir, seraient les stimuli audiovisuels. Cette interaction entre la perception et la production au niveau du cortex moteur jouerait un rôle important dans l'apprentissage, plus précisément dans la perception, la reconnaissance et l'imitation des actions (Rizzolatti et al., 2001; Watkins et al., 2003) et supporterait la théorie de l'esprit, soit l'habileté à pouvoir se placer dans le même état mental et émotionnel qu'autrui (Humphrey, 1976; Premack & Woodruff, 1978). Ainsi chez l'humain, la compréhension de l'activation du système miroir nous donnerait plus d'informations sur les bases biologiques sous-tendant ces comportements sociaux essentiels, comme l'apprentissage du langage et l'interaction avec autrui, ou encore le développement de l'empathie.

## **1.2 Stimulation magnétique transcrânienne**

L'investigation du système miroir chez le primate a souvent été faite à l'aide de techniques invasives d'enregistrement direct de l'activité neuronale. Des techniques non-invasives alternatives ont été développées pour investiguer la présence du système correspondant chez l'humain. Fadiga et ses collègues (1995) ont été parmi les premiers à utiliser la stimulation magnétique transcrânienne (TMS) pour explorer l'excitabilité du cortex moteur humain. La TMS est un outil neuropsychologique focal qui génère des impulsions magnétiques appliquées sur le cerveau à l'aide d'une bobine électromagnétique, souvent en forme de « huit » inversé. Cette impulsion magnétique pénètre superficiellement le cerveau et atteint une région corticale ciblée. L'impulsion induit par la suite une décharge électrique dans les neurones dont les fibres sont positionnées perpendiculairement à la stimulation, et a la capacité de stimuler ou d'inhiber temporairement cette région (Hallett, 2000). Lorsqu'un champ magnétique est appliqué sur le cortex moteur à un endroit

précis correspondant à muscle du corps, une contraction contralatérale involontaire peut être observée dans ce muscle. L'amplitude de la contraction évoquée par la TMS, appelée potentiel évoqué moteur (PÉM), peut être mesurée et enregistrée à l'aide d'électrodes. Il est possible d'établir l'excitabilité d'une région spécifique du cortex moteur dans différentes conditions en déduisant l'amplitude des PÉMs évoqués par la TMS à cet endroit au repos de l'amplitude des PÉMs obtenus durant une tâche qui active le système miroir.

En raison de ses propriétés non-invasives et de son utilisation sécuritaire, la TMS a été utilisée à de nombreuses reprises pour investiguer le cortex moteur humain durant la perception visuelle d'action (Fadiga et al, 1995; Aziz-Zadeh, Maeda, Zaidel, Mazziotta & Iacoboni, 2002; Gangitano, Mottaghy & Pascual-Leone, 2001). Dans son étude pionnière en TMS, Fadiga et al. (1995) ont comparé les PÉMs obtenus lorsque des sujets humains observaient une action à ceux obtenus lorsqu'ils exécutaient cette même action, soit prendre un objet. Il a noté que les PÉMs, enregistrés par des électrodes placées sur un muscle de la main (*premier dorsal interosseux*), étaient plus amples lors de l'observation du mouvement qu'au repos, et que cette activité correspondait au même patron d'activation corticale que lorsque les sujets prenaient eux-mêmes l'objet. Cette augmentation de l'excitabilité lors de l'observation du mouvement est expliquée par l'activation des neurones miroirs et a su être démontrée chez l'humain de façon non-invasive par la TMS.

### **1.3 Musique et langage dans le cortex moteur**

Bien qu'il ait été suggéré que les fonctions langagières soient principalement traitées dans l'hémisphère gauche, comme l'a par exemple montré l'étude TMS sur la parole de Watkins et al. (2003), l'organisation des processus cognitifs liés à la musique dans le cerveau reste à être clarifiée (Peretz & Zatorre, 2005). En fait, de multiples régions des hémisphères gauche et droit seraient activées lors d'activités musicales, avec légèrement plus d'activité dans l'hémisphère droit pour le traitement de la hauteur tonale (Peretz & Zatorre, 2005).

Une étude TMS a démontré une latéralisation de l'excitabilité corticale liée au traitement de la parole et du chant dans le cortex moteur (Sparing et al., 2007). Les

participants devaient soit chanter (fredonner un air sans parole ou chanter une chanson), soit parler (réciter un proverbe ou produire des syllabes sans signification, condition contrôle). Des impulsions TMS ont été appliquées sur le cortex moteur, sur la représentation de la main, pendant que les participants produisaient du chant ou de la parole. Les résultats de l'étude ont montré une plus grande excitabilité de l'hémisphère droit lors de la production du chant et une plus grande excitation de l'hémisphère gauche lors de la production de la parole en comparaison de la production de syllabes sans signification. L'augmentation de l'excitabilité dans les deux conditions, sous la forme de PÉMs plus amples, a été établie en comparaison avec une condition contrôle visuelle et non-motrice, où les participants devaient regarder des figures abstraites.

Dans une étude menée au laboratoire BRAMS (Stahl, Lessard, Lidji, Théorêt & Peretz, 2009), inspirée en partie de cette étude de Sparing et al. (2007), la latéralisation de l'activation et l'excitabilité des neurones miroirs du cortex moteur ont été comparées durant la production mais aussi durant la perception auditive, visuelle et audiovisuelle de la parole et du chant. L'étude anticipait une plus grande excitabilité à gauche pour la parole et à droite pour le chant. La TMS a été appliquée à la région de la main du cortex moteur dans le but d'induire des PÉMs dans la main controlatérale; les amplitudes de ces PÉMs ont été comparées en fonction de l'hémisphère stimulé, la tâche (chant ou parole) et les conditions (production ou perception) présentées aux participants.

Les résultats de cette étude ont montré une interaction entre la tâche et l'hémisphère, avec des PÉMs plus grands dans la condition de parole en comparaison du chant et ce, spécifiquement pour l'hémisphère gauche. Une interaction entre la tâche et la condition a, de plus, révélé que les amplitudes des PÉMs étaient plus grandes dans la condition de parole par rapport au chant, et pour les conditions de production et de perception visuelle seulement.

L'analyse des données de cette étude exploratoire n'a cependant pas généré des résultats supportant les études précédentes sur la latéralisation de l'activité corticale pour ce qui est des tâches liées au chant, comme dans Sparing et al. (2007) par exemple. En effet,

cette étude n'a pas montré plus d'activité motrice après stimulation de l'hémisphère droit pour la condition de perception ou de production de chant.

Notre étude s'inspire de celle menée par Stahl et al. (2009). Toutefois, les PÉMs ont été enregistrés sur un muscle de la main plutôt qu'un muscle de la bouche. Comme plusieurs études l'ont suggéré précédemment, les muscles spécifiquement impliqués dans la production du langage seraient aussi activés distinctivement dans la perception du langage (Strafella & Paus, 2000, Watkins et al., 2003). Comme les tâches de langage et de chant impliquent l'activation de muscles faciaux et non des muscles de la main, la probabilité de trouver une activation motrice significative serait plus élevée en enregistrant l'activité d'un muscle de la bouche que de la main. Dans l'étude suivante, les PÉMs ont été enregistrés sur le muscle *orbicularis oris* afin de remédier à ce problème.

Comme nous souhaitons recueillir l'activité motrice à partir de *l'orbicularis oris* et qu'une tâche de production vocale interfère avec l'activité enregistrée à partir de la bouche, une tâche de perception était indiquée pour atteindre ce but. L'étude de Watkins et al. (2003) a d'ailleurs montré que le système miroir pouvait être activé uniquement par une tâche de perception de la parole.

Finalement, le petit nombre de participantes (7) dans l'étude de Stahl et al. (2009) diminue la probabilité de trouver un patron d'activation motrice fiable. Un plus grand nombre de participants a été utilisé dans l'étude suivante afin d'améliorer la puissance statistique.

## **1.4 Objectifs et hypothèses**

La présente étude est une adaptation de Stahl et al. (2009) et l'objectif était de comparer l'implication et la latéralisation du système miroir en réponse à la perception de la parole et du chant. Cette étude est novatrice et différente de cette première étude, particulièrement pour le volet de perception du chant, car il s'agit de la première étude TMS à investiguer si la perception audiovisuelle du chant (en comparaison avec la

perception audiovisuelle du langage) active un système de neurones miroirs, et ce, en enregistrant des PÉMs sur un muscle de la bouche au lieu de la main.

Dans l'étude suivante, deux hypothèses principales ont été formulées:

- 1) Les amplitudes des PÉMs seront plus amples après stimulation de l'hémisphère droit pour la tâche de perception du chant en comparaison de l'hémisphère gauche.
- 2) Les amplitudes des PÉMs seront plus amples après stimulation de l'hémisphère gauche pour la tâche de perception de la parole en comparaison de l'hémisphère droit.

Dans cette étude, les participants n'ont pas été sélectionnés pour leur expérience musicale afin que la difficulté d'exécution des deux tâches soit comparable. Plus précisément, nous ne voulions pas que nos participants aient été préalablement entraînés à la reconnaissance d'intervalles musicaux afin qu'ils puissent utiliser l'information audiovisuelle des vidéos (comme par exemple le degré d'ouverture de la bouche) et non uniquement l'information auditive afin d'accomplir la tâche.



## **2. Excitabilité du système miroir dans la parole et le chant**

L'étude suivante a pour but d'examiner l'implication et la latéralisation du système miroir humain dans la perception du chant et de la parole.

### **2.1 Méthode**

#### *Participants*

Onze participants âgés entre 22 et 31 ans ont complété cette étude sur une base volontaire (6 femmes;  $M = 25.45$  ans;  $ET = 3.01$  ans, voir tableau I pour une description des participants). Préalablement au début de l'étude, des informations leur ont été fournies sur le fonctionnement de la TMS. Tous les participants ont rempli un questionnaire d'inclusion pour s'assurer qu'ils ne présentaient pas de contre-indication à la passation de l'étude. Ainsi, aucun d'entre eux n'avaient d'antécédents neurologiques ou épileptiques, ne prenaient au moment de l'étude une forme de médication pouvant agir sur le système nerveux ou étaient enceintes. Tous les participants étaient droitiers, et leur langue maternelle était le français. Il était, en effet, important que nos participants soient francophones, comme des proverbes de la langue française étaient présentés dans une des deux conditions expérimentales et qu'ils devaient pouvoir juger si l'explication donnée pour chacun des proverbes était juste ou non. Les participants n'étaient pas sélectionnés pour leur expérience musicale ( $M = 2.45$  ans d'éducation formelle privée (0-6)) et ne pratiquaient pas d'instrument de musique au moment de l'expérimentation. Tous les participants ont signé un formulaire de consentement les informant du déroulement de l'étude, du fonctionnement de la TMS ainsi que des avantages et inconvénients associés. Cette étude a été approuvée par le comité d'éthique de la recherche de la Faculté des arts et des sciences de l'Université de Montréal (CÉRFAS).

Tableau I. Description des participants et scores obtenus dans les conditions de chant et de parole (% de réponses correctes)

		<b>Participants</b>
<b>N</b>		11 (6 F)
<b>Âge (années)</b>		25.45 (min. 22 - max. 31)
<b>Années de scolarité (années)</b>		19.09 (min. 16 – max. 22)
<b>Années de cours privés de musique (années)</b>		2.45 (min. 0 – max. 6)
<b>Résultats obtenus (% correct)</b>	<b>Tâche chant<sup>1</sup></b>	87.3% (min. 70.4 – max. 94.4)
	<b>Tâche parole<sup>1</sup></b>	86.9% (min. 77.5 – max. 94.4)

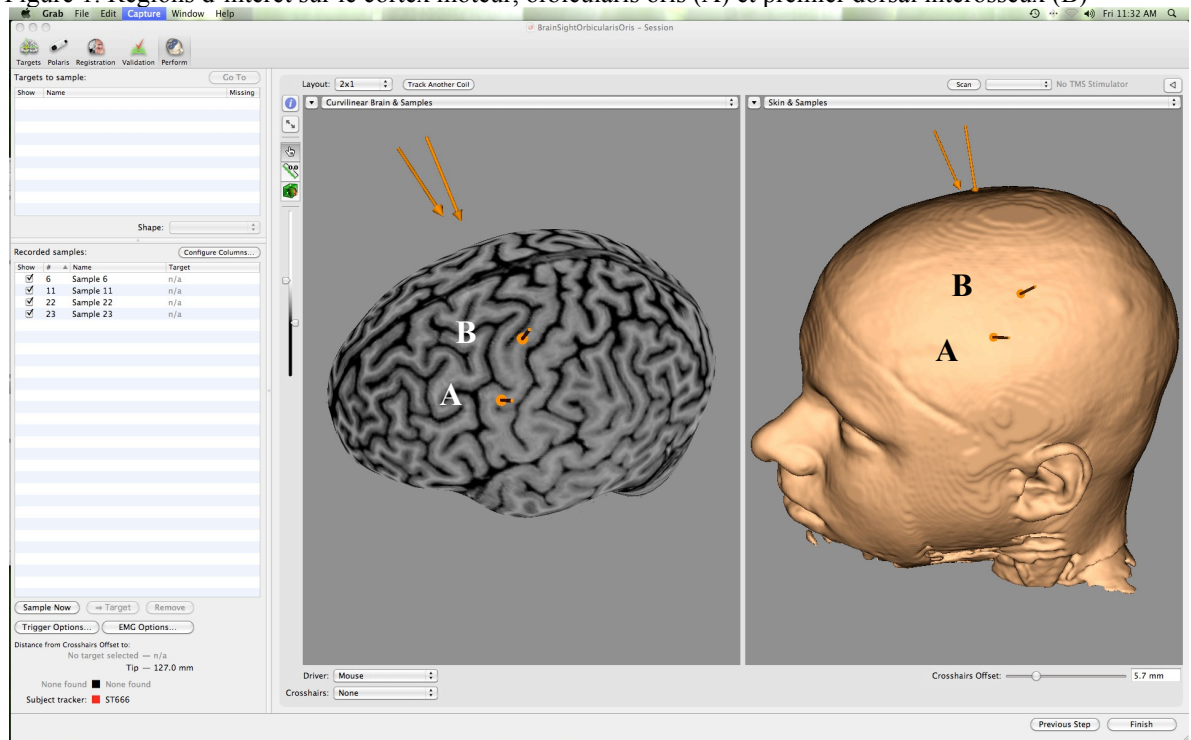
#### *Préparation des participants et acquisition des PÉMs*

L'étude s'est déroulée au Laboratoire international de recherche sur le cerveau, la musique et le son (BRAMS), dans le laboratoire TMS. Avant de commencer l'expérience, les représentations de la main et de la bouche devaient être localisées sur le cortex moteur des participants. Il était initialement nécessaire de localiser la région de la main sur le cortex moteur parce que celle de la bouche était identifiée par rapport à l'emplacement de la représentation de la main. De façon générale, il est plus difficile d'enregistrer les PÉMs sur l'*orbicularis oris* que sur que la région de la main parce que cette région est plus difficilement identifiable que celle de la main. C'est pourquoi il est utile de déterminer l'emplacement de la représentation de la main pour guider la localisation de l'*orbicularis oris*. Bien que chaque cerveau et crâne présentent des différences anatomiques uniques, l'emplacement de la représentation de la main se situait habituellement à environ 5 cm de CZ ventralement le long de l'axe interaural (ou le tiers de la distance entre CZ et l'oreille) et la représentation de la bouche à environ 2 cm ventralement de la représentation de la main, légèrement antérieure à celle-ci (voir la figure 1 un pour une illustration de ces représentations sur le cortex moteur gauche d'un participant). Afin de pouvoir enregistrer

<sup>1</sup> Les tâches de chant et de parole sont décrites dans la section tâche et procédure de la page 12.

les PÉMs issus de la stimulation de ces régions, des électrodes Ag/AgCl de 8 mm ont été placées sur l'*orbicularis oris* (bouche), plus précisément sous les coins de la bouche (Triggs, Ghacibeh, Springer & Bowers, 2005), et sur le *premier dorsal interosseux* (main), et l'électrode de terre a été placée à l'intérieur du poignet. Comme le muscle de la bouche est rarement au repos, les participants ont été entraînés à maintenir une contraction des lèvres (comme s'ils articulaient la lettre « U » de façon continue) de l'ordre de 20-30% de leur contraction maximale (Watkins et al., 2003). Cette contraction facilite aussi la localisation de la représentation de la bouche sur le cortex moteur, comme elle excite cette région. Les participants étaient invités à maintenir ce niveau de contraction durant la stimulation TMS. Les PÉMs ont été enregistrés controlatéralement à l'hémisphère stimulé à l'aide du système d'amplification Dual Bio Amp couplé avec le système d'acquisition Powerlab 4/30, et du logiciel Scope V4.1 (ADInstruments, Sydney, Australie). Tout au long de l'expérience, les participants étaient confortablement assis dans une chaise ajustable.

Figure 1. Régions d'intérêt sur le cortex moteur, orbicularis oris (A) et premier dorsal interosseux (B)



### *Stimulation magnétique transcrânienne*

Dans cette étude, un champ magnétique a été appliqué sur la représentation de la bouche du cortex moteur des participants, afin d'examiner comment la perception du chant et de la parole était activée et latéralisée dans le système miroir. Le champ magnétique a été généré par un appareil Magstim 200 (Magstim, Dyfed, UK) à l'intersection d'une bobine en forme de huit, placée perpendiculairement au site optimal de stimulation. La technique utilisée était celle de la stimulation simple (single pulse), traditionnellement utilisée dans les études TMS qui investiguent le système miroir. Un PÉM a d'abord été généré sur le *premier dorsal interosseux*, puis la bobine a été déplacée ventralement le long de l'axe interaural puis antérieurement jusqu'à ce qu'un PÉM ayant une latence d'environ 12-13 millisecondes (ms) soit obtenu suite à la stimulation de la représentation de l'*orbicularis oris* (Triggs et al., 2005; Watkins et al., 2003; K. Watkins, Communication personnelle 2009; H. Théoret, Communication personnelle, 20 octobre 2009). L'intensité de stimulation utilisée dans la tâche correspondait à celle qui provoquait un PÉM d'environ 1 millivolt d'amplitude et était réglée à 100% de ce seuil moteur. La même intensité de stimulation était utilisée pour les deux hémisphères à l'intérieur de la même condition (i.e. chant ou parole). Le logiciel de navigation Brainsight 2 (Rogue Research Inc., Montréal, Canada) a été utilisé lors de la localisation des régions et durant toute la durée de l'expérience afin de s'assurer de la précision de l'emplacement de la bobine sur le cortex moteur des participants. Les stimuli audiovisuels ont été présentés aux participants à l'aide du logiciel E-prime 2.0 (Psychology Software Tools, Pittsburgh, US) et le son provenait de deux haut-parleurs de marque Genelec 8040A (Bi-amplified monitoring system, Finlande).

### *Tâches et procédure*

L'expérience est divisée en deux conditions : une de perception audiovisuelle du chant et l'autre de perception audiovisuelle de la parole (voir le tableau II pour un résumé de la procédure expérimentale). Ces conditions ont été administrées en 2 sessions séparées, d'environ une heure trente chacune, espacées d'au moins une semaine. Les deux

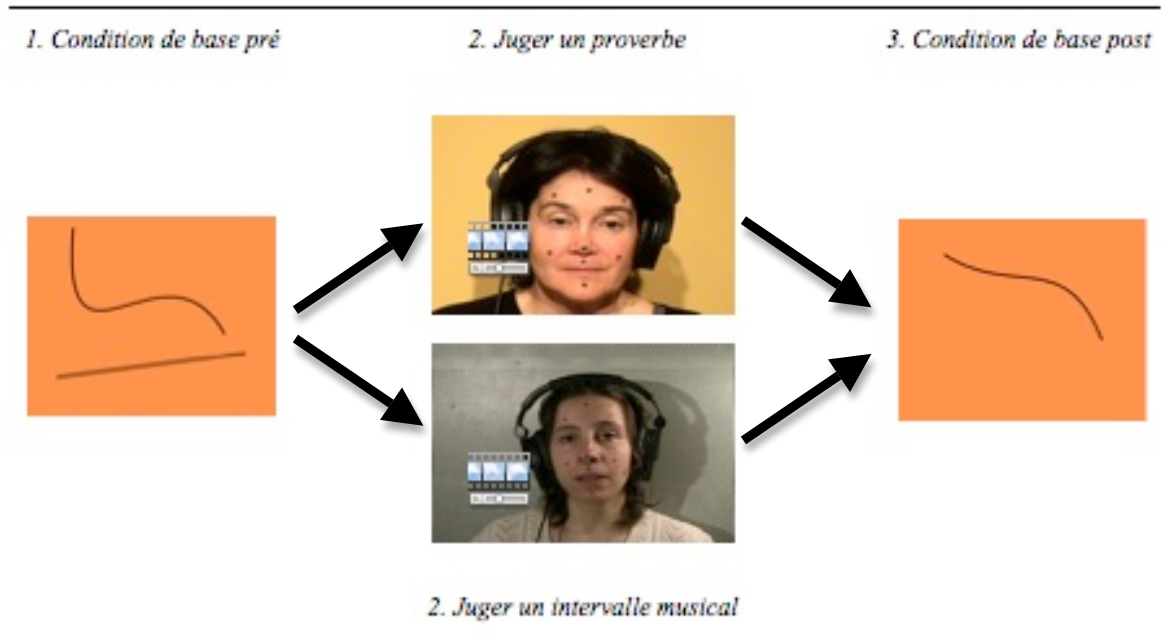
hémisphères ont été stimulés durant une session. L'ordre des conditions et des hémisphères stimulés a été contrebalancé entre les participants.

Tableau II. Résumé de la procédure expérimentale

	<b>Chant</b>	<b>Parole</b>
<b>1</b>	<b>Condition de base pré</b> (présentation de figures abstraites) 10 figures / hémisphère Validation : « Est-ce que la figure était ouverte? »	
<b>2</b>	<b>Juger un intervalle musical</b> 70 essais / hémisphère	<b>Juger un proverbe</b> 70 essais / hémisphère
<b>3</b>	<b>Condition de base post</b> (présentation de figures abstraites) 10 figures / hémisphère Validation : « Est-ce que la figure était ouverte? »	

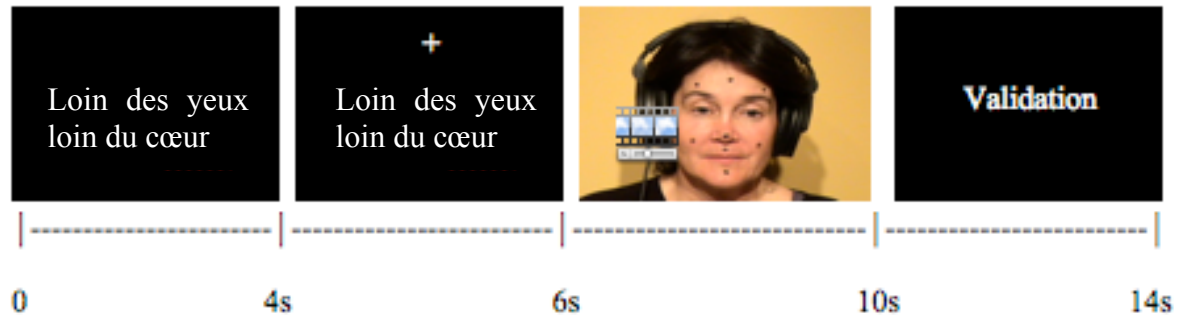
Afin d'établir le niveau d'activation de base de la région de la bouche du cortex moteur, une condition contrôle a été incluse avant et après chaque condition expérimentale (voir la figure 2 pour un exemple de stimuli utilisés dans les conditions de base et dans les tâches). Elle consistait en la présentation successive de 10 figures abstraites par hémisphère (20 figures au total pour la condition contrôle pré-expérimentale et 20 figures au total pour la condition contrôle post-expérimentale). Cette condition contrôle, qui en principe n'active pas le système miroir, avait pour but de permettre la comparaison de l'activation de base générée par la TMS (condition contrôle) par rapport à l'activation générée par la TMS lors de l'activation du système miroir (tâches de langage et de chant). La condition contrôle a été placée avant et après la tâche afin de voir si un effet de fatigue ou d'entraînement pouvait être observé en cours de session.

Figure 2. Exemple des stimuli utilisés dans les conditions de base et dans les tâches



La première condition, la tâche de perception de la parole, consistait en une vidéo d'une femme expliquant un proverbe préalablement montré à l'écran (par exemple, « Loin des yeux loin du cœur », voir la figure 3 pour un résumé du déroulement de la tâche et l'Annexe 1 pour la liste des proverbes utilisés). Le proverbe écrit était d'abord présenté à l'écran durant 4 secondes, puis une croix blanche apparaissait au haut de l'écran pendant 2 secondes. Cette croix indiquait au participant que la vidéo démarrerait sous peu et lui rappelait de maintenir sa contraction buccale en forme de « U ». Chaque vidéo d'explication présentée ensuite durait 4 secondes pendant lesquelles les participants voyaient et entendaient une personne expliquer un proverbe. La stimulation TMS était générée durant la présentation de cette vidéo. Finalement, un écran de validation était présenté pendant 4 autres secondes, durant lesquelles le participant devait dire si oui ou non l'explication correspondait au proverbe écrit présenté avant la vidéo, afin de s'assurer que les participants se concentraient sur la tâche. Les réponses des participants étaient enregistrées à l'aide d'un microphone (AKG, Autriche). Dans 10% des vidéos, la définition ne correspondait pas au proverbe présenté.

Figure 3. Déroulement de la tâche de perception de la parole



Afin de déterminer de quelle façon le système miroir s'activait dans le temps, les stimulations étaient présentées dans 7 fenêtres temporelles de 500 ms distribuées sur les 4000 ms des vidéos. Plus précisément, la stimulation TMS pouvait être déclenchée aléatoirement à 500, 1000, 1500, 2000, 2500, 3000 ou 3500 ms après le début de la vidéo d'explication. Ces fenêtres ont été choisies puisqu'elles correspondaient toutes à des moments de production musicale ou langagière. 70 vidéos par condition étaient présentées : 35 par hémisphère au total, 10 par fenêtre temporelle. L'étude de l'activation du système miroir dans le temps avait pour objectif de déterminer s'il existe une période sensible pour activer le système miroir après le début de la présentation des stimuli.

La deuxième condition, la tâche de perception du chant, consistait en une vidéo d'une femme chantant un intervalle musical ascendant préalablement écrit à l'écran (par exemple, « Seconde mineure », voir la figure 4 pour un résumé du déroulement de la tâche de chant). Considérant que les participants recrutés n'avaient pas ou très peu d'expérience musicale parascolaire, ceux-ci se sont entraînés pendant environ une semaine avant l'expérimentation afin de pouvoir reconnaître les différents intervalles. Pour les aider, chacun des douze intervalles était associé à une pièce musicale connue (par exemple, la seconde mineure correspond aux deux premières notes du thème du film « Les dents de la mer », voir Annexe 2 pour la liste des intervalles utilisés). Ce rappel était présent en dessous du nom de l'intervalle écrit durant la tâche.

Figure 4. Déroulement de la tâche de perception du chant



Figure 5. Progression temporelle de la vidéo de chant



L'un des douze intervalles possibles était d'abord présenté à l'écrit à l'écran durant 4 secondes et une note au piano était entendue pendant 2 secondes. Cette note correspondait à la première note de l'intervalle qui serait chanté dans la vidéo subséquente. Elle servait également à rappeler au participant qu'il devait maintenir sa contraction buccale. Par la suite, une vidéo de 4 secondes était présentée durant laquelle un intervalle était chanté par une chanteuse, et la stimulation TMS était générée durant cette vidéo, selon les mêmes fenêtres temporelles que dans la condition de parole. En moyenne, la première note de l'intervalle était produite à 0.21 seconde (ET= 0.12 s.) suivant le début de la vidéo, et la deuxième note à 2.21 secondes (ET= 0.097 s.) (voir la figure 5 pour un résumé de la progression temporelle de la vidéo de chant). Un écran de validation de 4 secondes apparaissait finalement afin que le participant puisse indiquer verbalement si oui ou non l'intervalle chanté correspondait à l'intervalle écrit. Ici aussi 70 vidéos par condition étaient

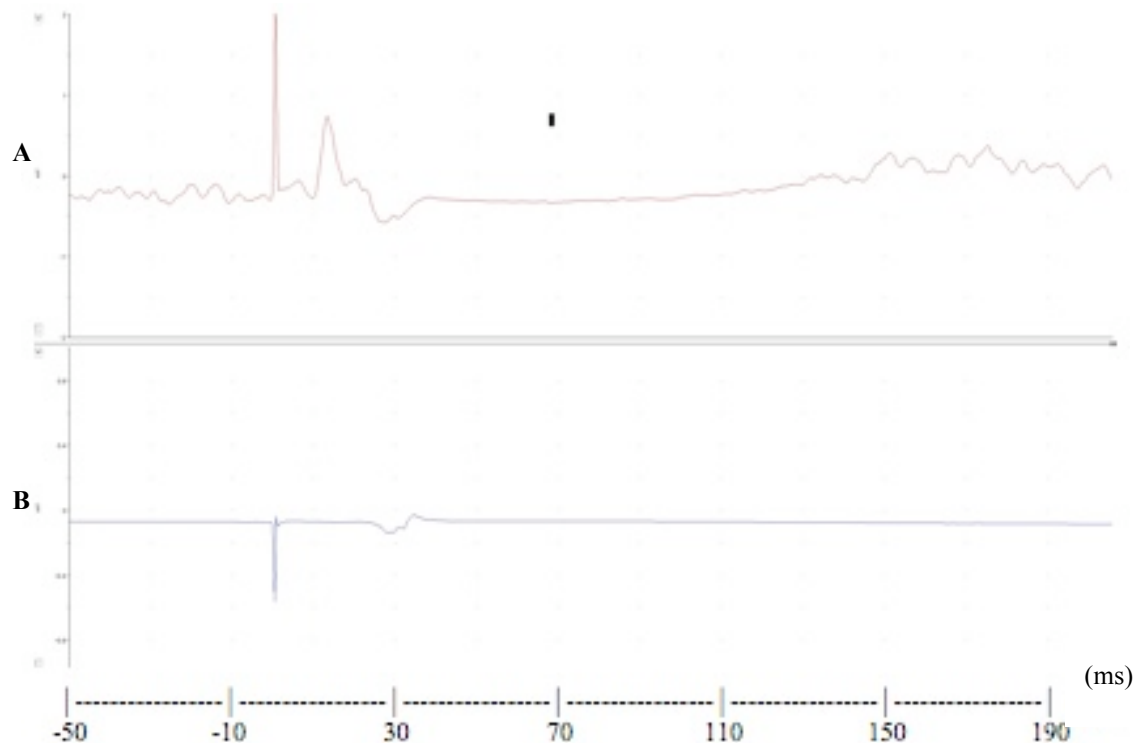


présentées : 35 par hémisphère au total, 10 par fenêtre et dans 10% des vidéos, l'intervalle chanté ne correspondait pas à l'intervalle écrit.

### *Analyses des données et normalisation*

Avant d'analyser statistiquement les PÉMs, leurs amplitudes brutes sommet à sommet ont été extraites du logiciel scope (voir la figure 6 pour un exemple de PÉM). Le signal obtenu pour chacune des stimulations TMS était présenté dans une fenêtre de 210 ms après le début de l'impulsion. Le moment zéro correspondait au moment où l'impulsion TMS a été générée durant la présentation de la vidéo ou de la figure abstraite. Ensuite, l'amplitude de chaque PÉM a été extraite. La latence moyenne d'un PÉM issu de la stimulation de la représentation de la bouche sur le cortex moteur est de 12-13 ms.

Figure 6. Exemple de potentiels évoqués moteurs recueillis sur l'orbicularis oris (A) et le premier dorsal interosseux (B)



Les données ont été normalisées par rapport à la moyenne de la condition contrôle pré- et post-expérimentale afin de connaître quelle portion du PÉM correspondait à l'activité motrice provoquée uniquement par la perception du stimulus, et non par la contraction musculaire en « U » ou l'activité engendrée par l'impulsion de la TMS. Pour obtenir des données normalisées, l'amplitude du PÉM obtenu dans la tâche a été divisée par l'amplitude moyenne obtenue dans la condition contrôle pré- et post-expérimentale, pour chacun des hémisphères séparément. La normalisation par division a été choisie puisqu'elle est moins sensible aux différences d'amplitudes initiales entre les données que la soustraction. La division nous permet d'obtenir un rapport plutôt qu'une différence, et est indépendante des différences d'écart entre les amplitudes des conditions contrôles et des tâches. Par exemple, une grande différence entre deux grands nombres peut signifier la même chose qu'une petite différence entre deux petits nombres, puisque ces différences auront le même ratio. La soustraction ne nous permet pas d'obtenir un tel rapport et conséquemment la normalisation par division a été retenue pour s'adapter aux types de résultats que nous avons obtenus.

## **2.2 Résultats**

Aucun participant n'a subi d'effet indésirable suite à la stimulation TMS. Pour chaque participant, la même intensité de stimulation était utilisée pour les deux hémisphères à l'intérieur d'une même condition. Un test *t* a révélé que l'intensité de stimulation utilisée pour les participants entre les deux conditions n'était pas statistiquement différente (parole = 59.09% de l'intensité maximale; chant= 57.27% de l'intensité maximale).

### *Données comportementales*

Tous les participants ont complété avec succès les tâches de chant et de parole. Pour des raisons techniques, les réponses comportementales d'un sujet pour la condition de chant n'ont pas pu être enregistrées, et celles-ci ont été exclues de cette section. Le pourcentage

de bonnes réponses pour la condition de chant était de 87.3% (70.4-94.4), et celui pour la condition de parole était de 86.9% (77.5-94.4). Dans le but de déterminer si une différence entre les pourcentages de réussite existait entre la condition de chant et de parole, un test *t* a été effectué. Les résultats ont montré qu'il n'existe pas de différence significative entre les pourcentages de succès des deux tâches, et suggère que les participants ont été également capables de réaliser les tâches.

### *Potentiels évoqués moteurs*

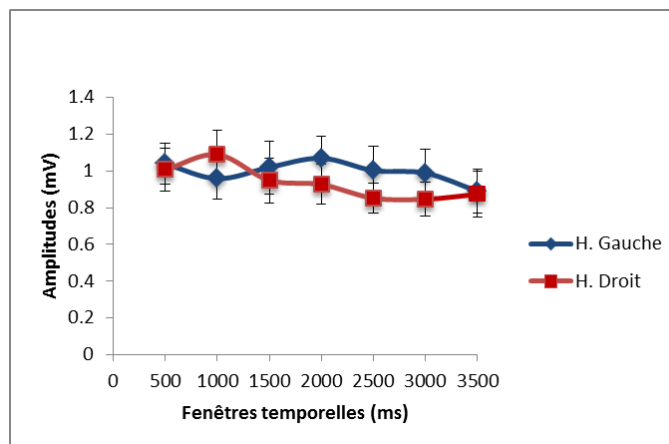
Dans le but de nous assurer que la condition contrôle (présentation de figures abstraites) n'avait pas d'effet sur l'amplitude ou la latéralisation des PÉMs dues à des variations initiales d'excitabilité du cortex moteur, une ANOVA à mesures répétées (2X2X2) ayant pour facteurs la condition, l'hémisphère et l'ordre de présentation (pré ou post) a été effectuée. Aucun effet de la condition ( $F(1, 10) = 1.29, p > .05$ ), de l'hémisphère ( $F(1, 10) = 0.79, p > .05$ ) ou de l'ordre de présentation ( $F(1, 10) = 2.25, p > .05$ ), ni aucune interaction entre les facteurs n'a été révélé (Condition\*hémisphère :  $F(1, 10) = 0.001, p > .05$ ; Condition\*ordre de présentation :  $F(1, 10) = 0.32, p > .05$ ). Aucun effet de fatigue ou d'entraînement ne peut être inféré. Ainsi, la condition contrôle a pu servir à la normalisation des données puisqu'elle reflète uniquement l'activation engendrée par la stimulation TMS, sans l'implication du système miroir. Dans les analyses suivantes, nous avons donc pu utiliser comme variables dépendantes les PÉMs normalisés par la moyenne des conditions contrôles pré- et post-expérimentales pour chaque hémisphère et condition.

Dans le but de connaître les effets des différentes conditions sur la latéralisation et l'amplitude des PÉMs suivant le moment de stimulation, les conditions de parole et de chant ont été analysées par des ANOVAs à mesures répétées (2X7) ayant pour facteurs l'hémisphère et les moments de stimulation.

## Parole

Une ANOVA à mesures répétées a d'abord été effectuée pour la condition de parole. L'analyse n'a révélée aucun effet du moment de stimulation ( $F(6, 60) = 1.76, p > .05$ ) ou d'hémisphère ( $F(1, 10) = 0.21, p > .05$ ) ni aucune interaction entre le moment et l'hémisphère ( $F(6, 60) = 1.11, p > .05$ ) (voir la figure 7 pour une figure résumant l'analyse).

Figure 7. Amplitudes des PÉMs normalisés pour la condition de parole



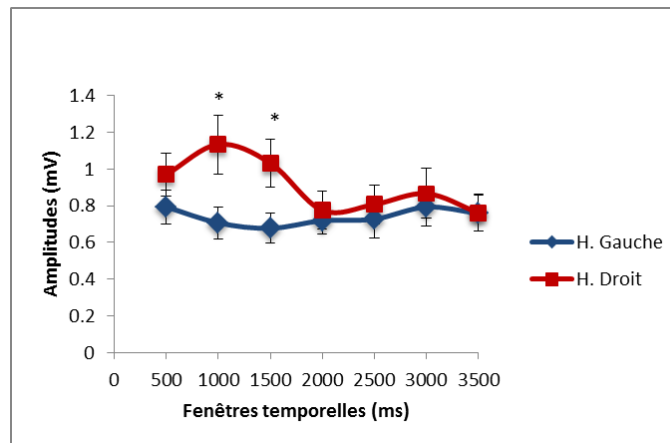
## Chant

Une ANOVA à mesures répétées séparée a aussi été effectuée sur les PÉMs obtenus dans la condition de perception du chant. Un effet significatif d'hémisphère a été observé, avec des réponses plus amples dans l'hémisphère droit ( $F(1, 10) = 4.93, p < .05$ ). Également, une interaction significative entre l'hémisphère et le moment de stimulation a été révélée ( $F(6, 60) = 3.29, p < .01$ ).

Afin de déterminer quelles fenêtres temporelles différaient des autres, des tests  $t$  subséquents ont été effectués pour chacune des fenêtres, entre les deux hémisphères pour cette condition. Les analyses ont révélé que les hémisphères droit et gauche différaient significativement lorsque la stimulation TMS était envoyée à 1000 ms ou 1500 ms à partir du début de la vidéo (1000 ms :  $t(10) = -2.86, p = .017$ , 1500 ms :  $t(10) = -4.68, p = .001$ ),

avec des amplitudes plus élevées pour l'hémisphère droit dans ces fenêtres temporelles (voir la figure 8 pour une figure résumant l'analyse).

Figure 8. Amplitudes des PÉMs normalisés pour la condition de chant



Une corrélation a été effectuée entre les amplitudes normalisées obtenues en parole et en chant afin d'examiner s'il y avait une association entre les amplitudes des réponses des deux tâches chez les participants. L'analyse n'a pas révélé de corrélation significative.

Dans le but de déterminer s'il y avait un lien entre le pourcentage de réponses correctes obtenues par les participants et l'amplitude de leurs réponses, diverses corrélations ont été effectuées. Les analyses n'ont montré aucune corrélation significative entre le taux de succès moyen et l'amplitude de la réponse moyenne des deux tâches. Également, aucune corrélation significative n'a été obtenue entre le taux de succès et les amplitudes obtenues pour chacun des hémisphères, et pour chacune des tâches.

Également, l'ordre de présentation des tâches a été examiné mais aucune corrélation significative entre la condition et l'amplitude de la réponse des sujets n'a été relevée.

Afin de déterminer si le sexe des participants avait un effet sur l'amplitude des PÉMs recueillis, des tests *t* ont été effectués pour chacune des conditions, sur la moyenne des PÉMs obtenus chez les hommes et les femmes. Les tests n'ont pas révélé de différence

significative dans l'amplitude de la réponse motrice entre les sexes, dans aucune des conditions.

## Discussion

L'objectif premier de cette étude était d'examiner l'implication et la latéralisation du système miroir humain dans la perception du chant en comparaison de la parole. Également, l'activation de ce système miroir à travers le temps a été investiguée. Deux hypothèses avaient été formulées, soit que (1) l'excitabilité du cortex moteur serait plus grande après stimulation de l'hémisphère droit pour la condition de perception du chant en comparaison de l'hémisphère gauche, et que (2) l'activation serait plus grande après stimulation de l'hémisphère gauche pour la condition de perception de la parole en comparaison de l'hémisphère droit.

Dans chacune des conditions, la stimulation magnétique transcrânienne a permis d'établir le niveau d'activation des cortex moteurs gauche et droit à travers 7 fenêtres temporelles en réponse à la perception de vidéos de chant et de parole. Nos manipulations ont permis de recueillir systématiquement des PÉMs issus du muscle de la bouche, et leurs latences de 12-13 ms nous permettent d'affirmer qu'ils provenaient bien d'une stimulation centrale du cortex moteur (Triggs et al., 2005). La perception du chant a eu un effet sur l'excitabilité du système miroir de l'hémisphère droit, se traduisant par de plus grands PÉMs après stimulation de l'hémisphère droit en comparaison du gauche et par une activation plus grande de l'hémisphère droit entre 1000 et 1500 ms après le début de la présentation des vidéos de chant.

L'hypothèse que l'excitabilité de l'hémisphère droit serait plus grande par rapport à l'hémisphère gauche dans la condition de chant a été confirmée. Ce résultat est en accord avec le fait que le traitement de la musique, ou plus précisément de la hauteur, se traduit typiquement par une plus grande activité dans l'hémisphère droit en comparaison de l'hémisphère gauche, tel que suggéré par Hyde, Peretz et Zatorre (2008). Spécifiquement dans notre étude, la présentation de vidéos de personnes chantant des intervalles musicaux a significativement recruté le système miroir de l'hémisphère droit de nos participants, en comparaison de l'hémisphère gauche. Ces données reproduisent les résultats obtenus par l'étude sur la latéralisation effectuée par Sparing et al., 2007, pour ce qui est de leur tâche musicale (soit chanter à voix haute ou fredonner une mélodie), mais dans une tâche de perception seulement plutôt que de production. Dans l'étude de Sparing et al. (2007), le

réseau cortico-spinal droit était facilité suite à la stimulation de l'hémisphère droit pour ces tâches musicales, alors qu'aucun effet de facilitation n'était rapporté suite à la stimulation de l'hémisphère gauche pour ces mêmes tâches musicales. Notre étude, en plus de reproduire cet effet, apporte des éléments supplémentaires. Nous avons montré pour la première fois que le système miroir droit pouvait être activé par une tâche de perception musicale, en enregistrant l'activité motrice au niveau de la bouche au lieu de la main. Ce résultat est de plus en accord avec des études telles que Watkins et al. (2003) et Strafella & Paus (2000) qui suggèrent que le système miroir est excité spécifiquement par la perception des muscles nécessaires à l'exécution d'un mouvement. Notre étude apporte des données supplémentaires pouvant appuyer cette théorie, dans le contexte d'une tâche musicale.

Nos résultats ont aussi montré que le système miroir droit s'active après la présentation audiovisuelle de stimuli musicaux moteurs, soit après 1 seconde à 1 seconde et demie après le début des vidéos. Dans des études ayant des protocoles similaires au nôtre, les impulsions de la TMS étaient typiquement envoyées aléatoirement dans un intervalle de 4 secondes après le début de la production musicale des participants (Sparing et al., 2007) ou encore à chaque 5 secondes durant la perception de parole des participants (Watkins et al., 2003). Notre étude permet donc une observation précise de l'activation du système miroir dans le temps, et nous permet de constater que le système miroir du cortex moteur droit est activé entre 1000 et 1500 ms suite à la perception de chant.

L'hypothèse que l'excitabilité de l'hémisphère gauche serait plus grande par rapport à l'hémisphère droit dans la condition de parole n'a pas été démontrée. Aucune différence entre les amplitudes des PÉMs enregistrés après stimulation des deux hémisphères n'a été trouvée dans cette condition. Ce résultat pourrait être expliqué par le fait que, bien que les participants aient été exposés dans leurs vies quotidiennes aux proverbes présentés dans l'étude, le jugement de l'exactitude de l'explication des proverbes est une tâche plus cognitive que la tâche de perception de chant. En effet, les participants devaient porter attention au contenu de l'explication et décider si elle correspondait bien au proverbe préalablement présenté. Dans cette tâche, ceux-ci n'avaient pas à anticiper une réponse spécifique comme dans la tâche de perception du chant, mais devaient plutôt comparer



l'explication des vidéos à un proverbe. De façon anecdotique, nos participants ont souvent émis le commentaire que les explications données dans les vidéos étaient parfois incomplètes, ou renvoyaient davantage à une reformulation du proverbe qu'à une explication. Ceci pourrait supporter l'hypothèse que la tâche de perception de la parole était plus cognitive que celle du chant, comme les participants ont analysé le contenu des explications, une tâche qui est différente de celle d'associer la perception de deux notes à un intervalle.

Également, une autre raison pouvant expliquer pourquoi aucune facilitation n'a été trouvée après stimulation de l'hémisphère gauche en comparaison du droit pour la tâche de perception de la parole pourrait être que nos stimuli étaient trop faciles à comprendre par nos participants. En effet, une étude de Murakami, Restle et Ziemann (2011) suggère que les PÉMs enregistrés sur l'*orbicularis oris* dans une tâche de perception de la parole augmentent directement en fonction de la difficulté de la tâche. Dans leur étude, le fait de diminuer la compréhension auditive de la parole en ajoutant du bruit ainsi que le fait de diminuer la clarté visuelle de l'articulation de la parole ont augmenté la facilitation des PÉMs enregistrés sur l'*orbicularis oris* en comparaison de conditions où aucun bruit n'était présent et où l'articulation de la parole était lente. Ce phénomène pourrait être expliqué par le fait que le système moteur est un système complémentaire spécialement recruté dans des contextes où la perception est ardue (Wilson, 2009). Mentionnons que contrairement à notre étude, l'étude de Murakami et al. (2011) rapporte des PÉMs issus de l'activation de l'*orbicularis oris* et du *premier dorsal interosseux* droit, mais qu'aucune comparaison des amplitudes des PÉMs obtenus suite à la stimulation de l'hémisphère droit (et donc de l'activation de l'*orbicularis oris* et du *premier dorsal interosseux* gauche) sont rapportés. Il n'est donc pas possible de savoir si ces résultats seraient observables et similaires ou non suite à la stimulation de chacun des hémisphères cérébraux. Il pourrait être intéressant d'observer si des différences d'augmentation de PÉMs seraient présentes avec nos stimuli lorsque l'intelligibilité de la parole ainsi que la rapidité de son débit sont modifiés.

Une hypothèse pouvant expliquer les résultats différents entre nos deux conditions est que, dans la tâche musicale, les participants avaient accès au nom de l'intervalle et à sa

note de départ. La majorité des participants ont rapporté qu'ils chantaient rapidement l'intervalle dans leurs têtes afin de vérifier si l'intervalle anticipé correspondait à celui de la vidéo. Ainsi, un chant subvocal, ou une planification vocale, serait utilisé dans la condition musicale afin de déterminer si l'intervalle était juste ou non. Comme la première note de l'intervalle était en moyenne produite autour de 210 ms, il est possible que vers 1000 à 1500 ms les participants aient été en train d'anticiper la deuxième note à venir. Cette planification vocale pourrait être à l'origine d'une augmentation de l'excitabilité motrice. Dans la condition de parole, il est moins probable que les participants aient eu à répéter mentalement les définitions des proverbes dans le but de juger si l'explication de la vidéo était juste ou non. Cette différence pourrait expliquer pourquoi aucun effet n'a été obtenu dans la tâche de parole en comparaison de la tâche de chant, puisqu'elle engageait possiblement moins les participants.

Bien que l'étude de Stahl et al. (2009) menée par notre laboratoire avait trouvé une interaction entre la tâche et l'hémisphère pour la condition de parole (avec plus d'activation globale pour l'hémisphère gauche en comparaison du droit), cet effet n'a pas été reproduit dans la présente étude. Or, il est important de préciser que dans l'étude de Stahl et al. (2009), il y avait systématiquement plus d'activation suite à la stimulation de l'hémisphère gauche que du droit dans les deux conditions, et ce, même lors des conditions contrôles. Dans notre étude, les amplitudes obtenues dans les conditions contrôles ne différaient pas significativement entre les hémisphères en fonction de la condition, ni en fonction du moment de présentation de la condition contrôle (pré- ou post-expérimentale). Ainsi, nous pouvons supposer que les amplitudes obtenues lors de notre condition contrôle n'a pas eu d'effet sur nos données, alors que cette hypothèse pourrait expliquer pourquoi plus d'activation a été trouvée à gauche qu'à droite dans l'étude de Stahl et al. (2009).

Mentionnons que les résultats de notre étude n'ont pas permis d'établir que le système miroir des hommes s'activait de façon différente de celui des femmes, même lorsque les stimuli vidéo utilisés présentaient des femmes uniquement. Cependant, la littérature abordant les différences dans l'activation cérébrale entre les hommes et les femmes paraît divisée. D'une part, Evers, Dannert, Rödding, Rötter et Ringelstein (1999)

ont observé une augmentation significative de flux sanguin cérébral dans l'hémisphère droit de non-musiciens lors de la perception d'harmonies, et cet effet était davantage prononcé chez les femmes que chez les hommes. Toutefois, d'autres études récentes n'ont pas trouvé d'association significative entre des facteurs personnels (selon le NEO-FFI après avoir contrôlé pour le sexe) et l'excitabilité du cortex moteur (Schecklmann et al., 2012), ou entre le sexe ou la dominance manuelle et les seuils moteurs, l'amplitude des PÉMs et le temps de conduction moteur central (Livingston, Goodkin & Ingersoll, 2010). Bien qu'aucune étude n'ait comparé spécifiquement la variabilité de la réponse motrice issue de l'*orbicularis oris* chez les hommes et les femmes, les résultats de notre étude ne suggèrent pas qu'il existe de différence dans l'activation cérébrale motrice entre les sexes dans une tâche de perception de parole et de chant. Notons cependant que cette absence de différence pourrait être due à une taille de groupe insuffisante (5 hommes et 6 femmes).

Dans notre étude, nous avons recruté des participants qui avaient peu ou pas d'entraînement musical ( $M = 2.45$  années de cours de musique). Or, il est intéressant de noter que certaines études ont trouvé un effet de l'expérience musical sur la latéralisation du traitement de l'information musicale et du langage (Ono et al., 2011 et Lin, Kobayashi & Pascual-Leone, 2002). Dans un premier temps, Ono et al. (2011), dans leur étude de magnétoencéphalographie, ont observé que différentes caractéristiques musicales telles que la hauteur, les accords, le rythme et le timbre sont traitées de façon prédominante dans le cortex auditif droit chez les non-musiciens ( $M = 0$  d'expérience musicale) tandis que les musiciens ( $M = 16.9 \pm 4.6$  années d'expérience musicale en piano) montreraient un patron d'activation plus symétrique dans les deux hémisphères pendant le traitement des mêmes stimuli musicaux. Selon les auteurs, ceci permet de supposer que l'entraînement musical change le rôle des hémisphères lors du traitement musical au niveau pré attentif. Dans le cadre de notre étude, ces résultats renvoient vers la possibilité que nos participants, qui ne possédaient pas ou peu d'expérience musicale, aient eu davantage d'activation dans leur hémisphère droit pour la tâche musicale que si nous avions enregistré l'activité cérébrale de musiciens expérimentés par exemple. Également, une autre étude de TMS a investigué les effets de l'entraînement musical sur la latéralisation du langage lors de la lecture à voix

haute (Lin, Kobayashi & Pascual-Leone, 2002). Des PÉMs étaient enregistrés sur le *premier dorsal interosseux* suite à la stimulation du cortex moteur de musiciens (plus de 10 ans de pratique musicale) et de non-musiciens (aucun entraînement musical). Les résultats montrent que les amplitudes des PÉMs étaient facilitées au niveau du *premier dorsal interosseux* droit (suite à la stimulation de l'hémisphère gauche) lors de la lecture à voix haute. Cependant, les musiciens présentaient également un effet de facilitation pour la même tâche au niveau du *premier dorsal interosseux* gauche (suite à la stimulation de l'hémisphère droit) alors que cet effet n'était pas observé chez les non-musiciens. Ces deux études pointent vers le fait qu'il existerait une interaction bi-hémisphérique plus prononcée chez les musiciens que chez les non-musiciens dans le traitement de la musique et du langage. Ces résultats nous permettent d'émettre l'hypothèse que les musiciens présenteraient des effets de latéralisation moins prononcés que les non-musiciens. Ceci n'explique toutefois pas pourquoi nous n'avons pas observé d'effet de facilitation dans notre tâche de perception de la parole comme nos sujets avaient peu d'expérience musicale. Peut-être que cette absence d'effet est encore une fois due à une taille de groupe insuffisante. Cependant, il est intéressant de noter que ce phénomène existe afin de pouvoir en tenir compte lors de prochaines études investiguant l'excitabilité motrice suite à la stimulation des hémisphères gauche et droit.

De plus, il serait intéressant de vérifier si le système miroir droit s'active de manière similaire, soit vers 1000 à 1500 ms après la présentation des stimuli musicaux chez les chanteurs que chez les non-musiciens. Nous pourrions supposer que si les chanteurs ont l'habitude de produire des intervalles musicaux, la tâche de perception d'intervalles serait moins difficile pour eux, et peut-être un patron d'activation reflétant davantage l'activation spécifique du système miroir serait trouvé, comme leur attention serait davantage portée sur l'articulation de l'intervalle, ou l'ouverture de la bouche des chanteuses des vidéos. Pour nos participants avec peu d'expérience musicale, il est possible que d'autres régions cérébrales soient recrutées en plus du système miroir, cette activation surpassant peut-être l'activation du cortex moteur droit.

À la lumière des résultats que nous avons obtenus dans cette étude, il pourrait être intéressant de penser que la plus grande réponse des participants dans la tâche de chant serait davantage liée à une planification vocale (par exemple, comment articuler la deuxième note de l'intervalle) plutôt qu'à la perception même d'intervalles. Ceci indiquerait que l'activation motrice serait davantage liée à une activation du système moteur plutôt que d'un système dit « miroir », et pourrait expliquer pourquoi moins d'activation motrice a été observée dans la tâche de perception de la parole. En effet, nous pourrions émettre l'hypothèse que cette tâche n'a pas activé le système moteur, comme les participants n'avaient pas à anticiper une réponse au même titre qu'ils devaient anticiper une deuxième note à un intervalle. Les résultats que nous avons obtenus pourraient donc s'inscrire davantage dans le cadre de l'activation d'un système moteur plutôt que miroir.

## Bibliographie

- Aziz-Zadeh, L., Maeda, F., Zaidel, E., Mazziotta, J. & Iacoboni, M. (2002). Lateralization in motor facilitation during action observation: a TMS study. *Experimental Brain Research, 144*(1), 127-131.
- Buccino, G., Binkofski, F., Fink, G. R., Fadiga, L., Fogassi, L., Gallese, V., Seitz, R. J., Zilles, K., Rizzolatti, G. & Freund, H.-J. (2001). Action observation activates premotor and parietal areas in a somatotopic manner: an fMRI study. *European Journal of Neuroscience, 13*(2), 400-404.
- D'Ausilio, A., Pulvermüller, F., Salmas, P., Bufalari, I., Begliomini, C. & Fadiga, L. (2009). The Motor Somatotopy of Speech Perception. *Current biology, 19*, 381-385.
- di Pellegrino, G., Fadiga, L., Fogassi, L., Gallese, V. & Rizzolatti, G. (1992). Understanding motor events: a neurophysiological study. *Experimental Brain Research, 91*, 176-180.
- Evers, S., Dannert, J., Rödding, D., Rötter, G. & Ringelstein, E.-B. (1999). The cerebral haemodynamics of music perception. A Transcranial Doppler sonography study. *Brain, 122*(1), 75-85.
- Fadiga, L., Fogassi, L., Pavesi, G. & Rizzolatti, G. (1995). Motor facilitation during action observation : a magnetic stimulation study. *Journal of Neurophysiology, 73*(6), 2608-2611.
- Gallese, V., Fadiga, L., Fogassi, L. & Rizzolatti, G. (1996). Action recognition in the premotor cortex. *Brain, 119*, 593-609.

- Gallese, V., Keysers, C & Rizzolatti, G. (2004). A unifying view of the basis of social cognition. *Trends in Cognitive Sciences*, 8(9), 396-403.
- Gangitano, M, Mottaghy, F. & Pascual-Leone, A. (2001). Phase-specific modulation of cortical motor output during movement observation. *Neuroreport*, 12(7), 1489-1492.
- Hallett, M. (2000). Transcranial magnetic stimulation and the human brain. *Nature*, 406(6792), 147-150.
- Humphrey, N. K. (1976). The social function of intellect. Dans P. P. G. Bateson & R. A. Hinde (Eds.), *Growing points in ethology* (303–317). Cambridge, Angleterre: Cambridge University Press.
- Hyde, K., Peretz, I. & Zatorre, R. (2008). Evidence for the role of right auditory cortex in fine pitch resolution. *Neuropsychologia*, 46(2), 632-639.
- Iacoboni, M., Woods, R.P., Brass, M., Bekkering, H., Mazziotta, J.C. & Rizzolatti, G. (1999). Cortical Mechanisms of Human Imitation. *Science*, 286, 2526–2528.
- Jesse, A. & Massaro, D. W. (2010). The temporal distribution of information in audiovisual spoken-word identification. *Attention, Perception & Psychophysics*, 72(1), 209-225.
- Keysers, C., Kohler, E., Umiltà, M.A., Nanetti, L., Fogassi, L. & Gallese, V. (2003). Audiovisual mirror neurons and action recognition. *Experimental Brain Research*, 153, 628-636.
- Kohler, E., Keysers, C., Umiltà, M.A., Fogassi, L., Gallese, V. & Rizzolatti, G. (2002). Hearing sounds, understanding actions: Action representation in mirror neurons. *Science*, 297, 846-848.

- Liberman, A. M. & Mattingly, I.G. (1985). The motor theory of speech perception revised. *Cognition*, 21(1), 1-36.
- Lin, KL, Kobayashi, M. & Pascual-Leone, A. (2002). Effects of musical training on speech-induced modulation in corticospinal excitability. *Neuroreport*, 13(6), 899-902.
- Livingston, S.C., Goodkin, H.P. & Ingersoll, C.D. (2010). The influence of gender, hand dominance, and upper extremity length on motor evoked potentials. *Journal of Clinical Monitoring and Computing*, 24, 427-436.
- McGurk, H. & MacDonald, J. (1976). Hearing lips and seeing voices. *Nature*, 264, 746-748.
- Murakami, T., Restle, J. & Ziemann, U. (2011). Observation-execution matching and action inhibition in human primary motor cortex during viewing of speech-related lip movements or listening to speech. *Neuropsychologia*, 49(7), 2045-2054.
- Ono, K., Nakamura, A., Yoshiyama, K, Kinkori, T., Bundo, M., Kato, T. & Ito, K. (2011) The effect of musical experience on hemispheric lateralization in musical feature processing. *Neuroscienc Letters*, 496, 141-145.
- Peretz, I. & Zatorre, R. (2005). Brain Organization for Music Processing. *Annual Review of Psychology*, 56, 89-114.
- Premack, D., & Woodruff, G. (1978). Does the chimpanzee have a theory of mind? *Behavioral and Brain Sciences*, 4, 515–526.
- Quinto, L., Thompson, W. F., Russo, F., & Trehub, S. E. (2010). A comparison of the McGurk effect for spoken and sung syllables. *Attention, Perception and Psychophysics*, 72(6), 1450-1454.



- Rizzolatti, G., Camarda, R., Fogassi, L., Gentilucci, M., Luppino, G. & Matelli, M. (1988). Functional organization of inferior area 6 in the macaque monkey. *Experimental Brain Research*, 71, 491-507.
- Rizzolatti, G., Fadiga, L., Gallese, V. & Fogassi, L. (1996). Premotor cortex and the recognition of motor actions. *Cognitive Brain Research*, 3(2), 131-141.
- Rizzolatti, G., Fogassi, L. & Gallese, V. (2001). Neurophysiological mechanisms underlying the understanding and imitation of action. *Nature Reviews*, 2, 661-670.
- Rizzolatti, G. & Craighero, L. (2004). The mirror-neuron system. *Annual Review of Neurosciences*, 27, 169-192.
- Schecklmann, M., Landgrebe, M., Frank, E., Sand, P.G., Elchhammer, P., Hajak, G. & Langguth, B. (2012). Is motor cortex excitability associated with personality factors? A replication study. *International Journal of Psychophysiology*, 83(3), 323-327.
- Sparing, R., Meister, I.G., Wienemann, M., Buelte, D., Staedtgen & Boroojerdi, B. (2007). Task-dependent modulation of functional connectivity between hand motor cortices and 19 neuronal networks underlying language and music: a transcranial magnetic stimulation study in humans. *European Journal of Neuroscience*, 25, 319-323.
- Stahl, B., Lessard, F., Lidji, P., Theoret, H. & Peretz, I. (2009). Speaking, singing and observing: A TMS study. Poster présenté à la conference Society for Music Perception and Cognition, Indianapolis, Août 2009.
- Strafella, A.P. & Paus, T. (2000). Modulation of cortical excitability during action observation: a transcranial magnetic stimulation study. *NeuroReport*, 11, 2289-2292
- Thompson, W. F. & Russo, F. A. (2007). Facing the Music. *Psychological Science*, 18,

756-757.

- Triggs, W. J., Ghacibeh, G., Springer, U. & Bowers, D. (2005). Lateralized asymmetry of facial motor evoked potentials. *Neurology*, *65*(4), 541-544.
- Umiltà, M. A., Kholer, E., Gallese, V., Fogassi, L., Fadiga, L., Keysers, C. & Rizzolatti, G. (2001). I Know What You Are Doing : A Neurophysiological Study. *Neuron*, *31*(1), 155-165.
- Watkins, KE., Strafella, A.P. & Paus, T. (2003). Seeing and hearing speech excites the motor system involved in speech production. *Neuropsychologia*, *41*, 989-994.
- Wilson S.M. (2009) Speech perception when the motor system is compromised. *Trends in Cognitive Sciences*, *13*(8), 329–330.

## Annexe 1

Liste des soixante-dix proverbes présentés aux participants.

---

1	Aux grands maux les grands remèdes.
2	Bien faire et laisser dire.
3	Ce que femme veut, Dieu le veut.
4	Les conseillers ne sont pas les payeurs.
5	L'habitude est une seconde nature.
6	Il n'y a pas de sot métier.
7	Un "tien" vaut mieux que deux "tu l'auras".
8	Mieux vaut tard que jamais.
9	Pas de nouvelle, bonnes nouvelles.
10	Qui se ressemble s'assemble.
11	Qui va à la chasse perd sa place.
12	Si jeunesse savait, si vieillesse pouvait.
13	Tout nouveau, tout beau.
14	Tout vient à point à qui sait attendre.
15	Il est facile de nager quand on vous tient le menton.
16	Il n'y a pas de grenouille qui ne trouve son crapaud.
17	Mieux vaut prévenir que guérir.
18	Si les chats gardent les chèvres, qui attrapera les souris?
19	Bonne renommée vaut mieux que ceinture dorée.
20	L'exception confirme la règle.
21	Il ne faut pas vendre la peau de l'ours avant de l'avoir tué.
22	Rome ne s'est pas construite en un jour.
23	Les petits ruisseaux font les grandes rivières.
24	Pauvreté n'est pas vice.
25	Qui donne aux pauvres prête à Dieu.
26	Qui sème le vent récolte la tempête.
27	Tel est pris qui croyait prendre.
28	Faute avouée est à moitié pardonnée.
29	Il faut prendre le taureau par les cornes.
30	Il n'y a que les imbéciles qui ne changent pas d'idée.
31	La vache la première au pré lèche toute la rosée.
32	On n'apprend pas aux vieux singes à faire des grimaces.
33	Qui couche avec des chiens se lève avec des puces.
34	À beau mentir qui vient de loin.
35	À l'impossible, nul n'est tenu.
36	L'argent est un bon serviteur et un mauvais maître.
37	Les bons comptes font les bons amis.
38	C'est en forgeant qu'on devient forgeron.
39	Charité bien ordonnée commence par soi-même.

---

40	Les grands diseurs ne sont pas les grands faiseurs.
41	Il faut battre le fer pendant qu'il est encore chaud.
42	Il faut tourner la langue 7 fois dans sa bouche avant de parler.
43	Les murs ont des oreilles.
44	La nuit porte conseil.
45	Loin des yeux loin du coeur.
46	Plus on est de fous, plus on rit.
47	Qui ne dit mot consent.
48	Qui ne risque rien n'a rien.
49	Tous les chemins mènent à Rome.
50	Toute vérité n'est pas bonne à dire.
51	Un homme averti en vaut deux.
52	Ce sont les tonneaux vides qui font le plus de bruit.
53	C'est à qui saura la chevaucher que la jument appartiendra.
54	Fais ce que je dis, ne fais pas ce que je fais.
55	Il ne faut pas jeter le bébé avec l'eau du bain.
56	Il ne faut pas juger de l'arbre par l'écorce.
57	On ne change pas une équipe qui gagne.
58	On ne fait pas d'omelettes sans casser d'oeufs.
59	On ne peut être à la fois au four et au moulin.
60	Qui veut aller loin ménage sa monture.
61	Quand les brebis enragent, elles sont pires que les loups.
62	Quand on met les mains à la pâte, il reste quelque chose aux doigts.
63	À coeur vaillant rien d'impossible.
64	Après la pluie, le beau temps
65	Mettre la charrue avant les boeufs.
66	Les loups ne se mangent pas entre eux.
67	Petit à petit, l'oiseau fait son nid.
68	Une fois n'est pas coutume.
69	Donner c'est donner, reprendre c'est voler.
70	Pluie du matin réjouit le pèlerin.

---

## Annexe 2

Liste des douze intervalles présentés aux participants et leurs chansons de référence.

	<b>Intervalle</b>	<b>Chansons de référence</b>
<b>1</b>	Seconde mineure	Thème de <i>Les dents de la mer</i>
<b>2</b>	Seconde majeure	Bonne fête
<b>3</b>	Tierce mineure	Ô Canada
<b>4</b>	Tierce majeure	<i>Ô when the saints</i>
<b>5</b>	Quarte	<i>Amazing grace</i> , thème de <i>Harry Potter</i>
<b>6</b>	Quarte augmentée	Thème de Les Simpsons
<b>7</b>	Quinte	<i>Twinkle twinkle little star</i>
<b>8</b>	Sixte mineure	Thème de Mon fantôme d'amour
<b>9</b>	Sixte majeure	Malbrough s'en va-t-en guerre
<b>10</b>	Septième mineure	Thème de <i>Star Trek</i> , Maman les petits bateaux
<b>11</b>	Septième majeure	<i>Take on me</i>
<b>12</b>	Octave	<i>Somewhere over the rainbow</i>