

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL

ÉTUDE DE LA LATÉRALISATION DE L'ACTIVITÉ MOTRICE INDUITE PAR
LE LANGAGE CHEZ L'ÊTRE HUMAIN ENTRE 5 ET 18 ANS

MÉMOIRE

PRÉSENTÉ

COMME EXIGENCE PARTIELLE

DE LA MAÎTRISE EN KINANTHROPOLOGIE

PAR

DAVID LABRECQUE

JUIN 2016

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL
Service des bibliothèques

Avertissement

La diffusion de ce mémoire se fait dans le respect des droits de son auteur, qui a signé le formulaire *Autorisation de reproduire et de diffuser un travail de recherche de cycles supérieurs* (SDU-522 – Rév.07-2011). Cette autorisation stipule que «conformément à l'article 11 du Règlement no 8 des études de cycles supérieurs, [l'auteur] concède à l'Université du Québec à Montréal une licence non exclusive d'utilisation et de publication de la totalité ou d'une partie importante de [son] travail de recherche pour des fins pédagogiques et non commerciales. Plus précisément, [l'auteur] autorise l'Université du Québec à Montréal à reproduire, diffuser, prêter, distribuer ou vendre des copies de [son] travail de recherche à des fins non commerciales sur quelque support que ce soit, y compris l'Internet. Cette licence et cette autorisation n'entraînent pas une renonciation de [la] part [de l'auteur] à [ses] droits moraux ni à [ses] droits de propriété intellectuelle. Sauf entente contraire, [l'auteur] conserve la liberté de diffuser et de commercialiser ou non ce travail dont [il] possède un exemplaire.»

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier en premier, pour son support, ma conjointe. Pour le défi que représente d'être étudiant aux cycles supérieurs et papa en même temps, je salue mon petit garçon Sébastien qui a deux «zans». Ma famille qui m'encourage sans vraiment savoir ce que je fais («Tu n'enseignes pas encore?»). Je remercie mon directeur Victor Frak pour son rôle de guide avec toute la patience que cela demandait d'avoir deux étudiants formés en enseignement qui font une maîtrise en sciences. Je souligne la collaboration de mon collègue Rémi Descheneaux-Leroux. Il m'a éloigné de la solitude qui peut se présenter en recherche et notre collaboration nous a permis de pousser le projet le plus loin qu'il fût possible de le faire en deux ans. Je remercie les techniciens Robin Drolet, Carole Roy et Jill Vandermeersch pour leur aide constante. À tous les professeurs du département pour leur support, particulièrement Alain-Steve Comtois et Émilie Kalinova. Je remercie le personnel du département et mes collègues de bureau pour la bonne ambiance qui règne sur l'étage. Finalement, je me remercie moi-même de m'être imposé ce défi enrichissant que je poursuivrai pendant les 4 prochaines années au doctorat.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	I
LISTE DES FIGURES	VII
LISTE DES TABLEAUX	IX
LISTES DES ABRÉVIATIONS, DES SIGLES ET ACRONYMES	XI
RÉSUMÉ	XIII
INTRODUCTION	1
CHAPITRE I	
PROBLÉMATIQUE	
1.1 Mes questions de recherche :	5
1.2 Hypothèses :	5
CHAPITRE II	
REVUE DE LA LITTÉRATURE	
2.1 Cerveau et langage	7
2.1.1 Région de Broca	8
2.1.2 Région de Wernicke	8
2.1.3 La communication entre Wernicke et Broca : le faisceau arqué	8
2.1.4 Maturation des aires du langage	9
2.2 Connexion interhémisphérique	9
2.2.1 Corps calleux	9
2.2.2 Délai de conduction interhémisphérique	11
2.3 Méthodes d'expérimentations antérieures	11
2.4 Sémantique et simulation motrice	15
2.4.1 Sémantique et fenêtres d'accès lexicales	15
2.4.2 Simulation motrice	16
2.5 La préhension chez l'enfant	17
CHAPITRE III	
MÉTHODOLOGIE	
3.1 Participants	19
3.2 Matériels d'expérimentation	21

3.2.1 Matériels physiques	21
3.2.2 Logiciels et matériel numérique.	22
3.2.3 Calibrage.....	24
3.3 Protocoles d'expérimentation	25
3.3.1 Conditions d'expérimentation	25
3.3.2 Protocole.....	25
3.4 Traitement des données	28
3.4.1 Données aberrantes.....	29
3.5 Analyses statistiques.....	31
3.5.1 Comparaison à la ligne de base	31
3.5.2 ANOVA à mesure répétée.....	32
CHAPITRE IV	
RÉSULTATS	
4.1 Comparaisons des moyennes à la ligne de base.....	33
4.2 Comparaisons des moyennes inter et intra groupes.....	34
4.2.1 Résultats de l'ANOVA à mesures répétées.....	34
4.2.2 Résultats du post hoc LSD.....	35
4.3 Analyse des graphiques	38
4.3.1 Analyse des MF des enfants.....	38
4.3.2 Analyse des MF des adolescents	40
CHAPITRE V	
DISCUSSION	
5.1 Le verbe, maturation vers la somatotopie.....	43
5.2 Le nom, un concept acquis plus jeune.....	45
5.3 Activité interhémisphérique	46
5.3.1 Les différences interhémisphériques des adolescents.....	47
5.3.2 Les différences interhémisphériques des enfants.	51
5.4 Données brésiliennes	52
5.5 Retour sur VD chez l'enfant	54
5.6 Limites du projet.....	54
5.7 Conclusion.....	56

APPENDICE A	
DOCUMENTS ET INFORMATIONS COMPLÉMENTAIRES À LA	
MÉTHODOLOGIE.....	59
APPENDICE B	
RÉSULTATS STATISTIQUES COMPLETS	75
RÉFÉRENCES.....	101

LISTE DES FIGURES

Figure	Page
2.1	Modèle du langage selon Geschwind 7
2.2	Faisceau arqué..... 8
2.4	Topographie du corps calleux 10
2.5	Capteur de force triaxiale 13
2.6	Cylindre avec capteur à l'intérieur 13
3.1	Matériel portatif 21
3.2	Capteur de force uniaxiale 22
3.3	Calibration des capteurs de force : courbe de tendance linéaire 24
3.4	Organisation de l'environnement du participant..... 26
4.1	MF du groupe d'enfants 39
4.2	MF du groupe d'adolescents 40
5.1	Comparaison intergroupe de VD 44
5.2	Comparaison intergroupe de ND 45
5.3	Comparaison intermanuelle du nom chez adolescents 47
5.4	Comparaison des MF de la main gauche des adolescents 48
5.5	Comparaison intermanuelle du verbe chez l'adolescent..... 49
5.6	Comparaison des MF de la main gauche des enfants 51
5.7	Graphique des MF de participants brésiliens 53

LISTE DES TABLEAUX

Tableau		Page
4.1	Résultats des MF comparativement à la ligne de base	34
4.2	Post hoc LSD, comparaisons inter-groupe.....	35
4.3	Post hoc LSD, comparaisons intra-groupe du facteur Mains	36
4.4	Post hoc LSD, comparaisons intra-groupe du facteur Mots	37
4.5	Post hoc LSD, comparaisons intra-groupe du facteur Temporel.....	37
B.1	Comparaisons des MF de ND avec la ligne de base.....	75
B.2	Comparaisons des MF de VD avec la ligne de base.....	76
B.3	Comparaisons des MF de NG avec la ligne de base.....	76
B.4	Comparaisons des MF de VG avec la ligne de base.....	77
B.5	Comparaisons des MF de ND avec la ligne de base.....	77
B.6	Comparaisons des MF de VD avec la ligne de base.....	78
B.7	Comparaisons des MF de NG avec la ligne de base.....	78
B.8	Comparaisons des MF de VG avec la ligne de base.....	79
B.9	Tests de sphéricité de Maulchy	80
B.10	Résultats de l'ANOVA	81
B.11	Résultats des comparaisons intergroupe de la condition ND.....	82
B.12	Résultats des comparaisons intergroupe de la condition NG.....	82
B.13	Résultats des comparaisons intergroupe de la condition VD.....	83
B.14	Résultats des comparaisons intergroupe de la condition VG.....	83
B.15	Résultats des comparaisons entre les mots sur la main droite des enfants	84

B.16	Résultats des comparaisons entre les mots sur la main droite des adolescents.....	85
B.17	Résultats des comparaisons entre les mots sur la main gauche des enfants	86
B.18	Résultats des comparaisons entre les mots sur la main gauche des adolescents.....	87
B.19	Résultats des comparaisons entre les mains suite aux noms chez les enfants	88
B.20	Résultats des comparaisons entre les mains suite aux noms chez les adolescents.....	89
B.21	Résultats des comparaisons entre les mains suite aux verbes chez les enfants	90
B.22	Résultats des comparaisons entre les mains suite aux noms chez les adolescents.....	91
B.23	Résultats des comparaisons entre les fenêtres successives pour la condition ND chez les enfants.....	92
B.24	Résultats des comparaisons entre les fenêtres successives pour la condition NG chez les enfants.....	93
B.25	Résultats des comparaisons entre les fenêtres successives pour la condition VD chez les enfants.....	94
B.26	Résultats des comparaisons entre les fenêtres successives pour la condition VG chez les enfants.....	95
B.27	Résultats des comparaisons entre les fenêtres successives pour la condition ND chez les adolescents.....	96
B.28	Résultats des comparaisons entre les fenêtres successives pour la condition NG chez les adolescents.....	97
B.29	Résultats des comparaisons entre les fenêtres successives pour la condition VD chez les adolescents.....	98
B.30	Résultats des comparaisons entre les fenêtres successives pour la condition VG chez les adolescents.....	99

LISTES DES ABRÉVIATIONS, DES SIGLES ET ACRONYMES

MF	Modulation de la force
ND	Condition dans laquelle les noms étaient des mots cibles et le sujet ayant le capteur dans la main droite
NG	Condition dans laquelle les noms étaient des mots cibles et le sujet ayant le capteur dans la main gauche
VD	Condition dans laquelle les verbes étaient des mots cibles et le sujet ayant le capteur dans la main droite
VG	Condition dans laquelle les verbes étaient des mots cibles et le sujet ayant le capteur dans la main gauche
UQAM	Université du Québec à Montréal
CSDL	Commission scolaire de Laval
IRMf	Imagerie par résonance magnétique fonctionnelle
aIPL	Région antérieure du lobule pariétal inférieur
M1	Aire motrice primaire
EHDAA	Élèves Handicapés ou élèves en Difficulté d'Adaptation ou d'Apprentissage
Msec	Millisecondes
mN ou N	Millinewtons ou Newtons

RÉSUMÉ

Les liens entre les fonctions langagières et les fonctions motrices sont de plus en plus présents dans la littérature. Cependant, le développement de ceux-ci au travers des âges est peu documenté. Avec des capteurs de force, nous avons mesuré les modulations de la force chez des enfants âgés de 5 à 10 ans et d'adolescents âgés de 13 à 17 ans suite à des stimuli linguistiques sonores. Les stimuli comparés étaient deux catégories de mots différentes, soit les noms et les verbes. La comparaison des modulations de la force entre ces deux groupes nous a permis de constater l'apport de la maturation de l'aire pariétale dans le traitement des verbes, l'importance de la maturation du corps calleux pour un traitement bihémisphérique du langage et l'intégration plus hâtive dans le développement des noms comparativement aux verbes.

Mots-clés : maturation, cerveau, aire pariétale, corps calleux, adolescence et enfant.

INTRODUCTION

Durant ma formation d'enseignant en éducation physique et à la santé, ainsi que lors de mon travail de suppléant et d'enseignant, j'ai enseigné à des jeunes catégorisés «élèves handicapés ou élèves en difficulté d'adaptation ou d'apprentissage» (EHDAA) parmi lesquels, il y avait des jeunes diagnostiqués dysphasiques. La dysphasie est un trouble neurologique qui se caractérise par des difficultés au niveau de l'expression et la compréhension du langage. Lors de mon travail d'enseignant d'éducation physique, j'ai été frappé de constater qu'ils avaient aussi des difficultés de motricité fine et globale. Face à cette réalité, et à celle présente dans d'autres troubles neurologiques, une question se pose : Y a-t-il un pont entre le langage et la motricité? C'est ce qu'affirment Hauk et al. en 2004, Frak et al. en 2010 ainsi que de nombreux autres chercheurs. Hauk et Tschentscher nous offrent une très bonne révision sur le sujet avec leur article de 2013. On dénote cependant que dans la grande majorité des recherches sur le sujet, à l'exception des études de cas, les participants sont des adultes droitiers avec un développement neurologique normal et que l'analyse est faite pour la motricité de la main dominante. La portée des recherches du lien entre le langage et la motricité a mené la communauté scientifique actuelle vers de nouvelles approches de réadaptation pour les personnes aphasiques, c'est-à-dire l'usage de la motricité pour améliorer le langage et l'usage du langage pour améliorer la motricité.

L'interaction «main-objet» forme un réseau d'aires cérébrales qui inclut la région antérieure du lobule pariétal inférieur (aIPL). Cette région transmet l'information des

différentes afférences sensitives et sensorielles au cortex prémoteur, ainsi qu'à l'aire du langage nommé aire de Broca. (Ramayya, Glasser, & Rilling, 2010). La région aIPL est une caractéristique unique de l'encéphale humain et elle joue un rôle dans la sémantique, dans la planification et dans l'imitation d'une action, tout en jouant un rôle dans le langage (Desai, Binder, Conant, Mano, & Seidenberg, 2011). La compréhension d'un mot d'action manuelle («grounding language») est liée au fait que l'action doit être incarnée avec la connaissance («embodied cognition») pour devenir un substrat corporel (par exemple Glenberg 1997; Hommel et al. 2001). Après avoir lié l'action au mot, une activité cérébrale est observée lors de la stimulation par celui-ci. Cela entraîne alors la planification de l'action qui active l'interaction «main-objet» et qui aboutit par une stimulation de la région motrice primaire (M1). Cette simulation de l'action n'étant pas nécessaire, elle devrait donc être inhibée (Jeannerod & Frak, 1999; Jeannerod, 1994).

L'inhibition de la stimulation de l'action a été mise en évidence lors d'une étude réalisée par Frak et al. 2010. Investigant alors l'interaction entre le langage et la force de préhension, ils ont observé une inhibition de l'activité musculaire en direct («on line») après que celle-ci ait été initiée par l'énoncé d'un verbe d'action manuelle.

La région pariétale antérieure joue donc un rôle essentiel dans le traitement des afférences sensorielles tel qu'expliqué plus tôt. Ceci a été démontré par des études réalisées auprès de sujets sains et de sujets ayant des lésions cérébrales; cette région contribue à créer des liens réciproques permettant l'organisation de l'activité musculaire en fonction de l'afférence linguistique. Durant le développement de l'enfant, particulièrement durant le développement du système nerveux central, est-ce

que le pont entre l'organisation de l'activité musculaire de la main en fonction de l'afférence linguistique est toujours présent? En théorie, il ne devrait pas être présent chez l'enfant âgé de moins de 11 ans, car dans les aires cérébrales impliquées, la myélinisation n'est pas suffisamment avancée et l'épuration de la matière grise n'est pas complétée (Toga, Thompson, & Sowell, 2006). Un autre aspect qui n'a pas été tenu en compte dans ce type de recherches, mais qui est très d'actualité dans la recherche pour la réadaptation des patients aphasiques, est la participation de l'autre hémisphère cérébral. Lorsqu'il est question de l'autre, cela veut dire l'hémisphère droit chez le droitier. Les fonctions linguistiques sont situées essentiellement dans l'hémisphère gauche, on parle ici de l'aire de Broca et de l'aire de Wernicke. De plus, le contrôle de la motricité fine est controlatéral (Rice, Tunik, Cross, & Grafton, 2007; Tunik, Rice, Hamilton, & Grafton, 2007). Dans les expériences de Frak citées plus haut, seule la force de la préhension de la main droite a été étudiée chez les droitiers. Que se passe-t-il dans l'hémisphère droit? Dans le cas de patients aphasiques, plusieurs parlent d'un homologue des aires du langage dans l'hémisphère droit. Actuellement, certains chercheurs proposent de stimuler l'homologue droit afin qu'il compense les troubles langagiers dus aux lésions de l'hémisphère gauche (Hartwigsen & Siebner, 2012; Kindler et al., 2012; Meltzer, Wagage, Ryder, Solomon, & Braun, 2013; Tyler, Wright, Randall, Marslen-Wilson, & Stamatakis, 2010). Cependant, d'autres chercheurs ont une opinion tout opposée et proposent de stimuler la région de Broca, dans l'hémisphère gauche, afin d'améliorer les performances linguistiques (Cattaneo, Pisoni, & Papagno, 2011; Restle, Murakami, & Ziemann, 2012).

L'objectif fondamental de ma recherche est donc d'apporter une lumière aux questions actuelles sur la participation des deux hémisphères en ce qui concerne l'activité motrice de la main induite par le langage. Dans le cas de la participation des

deux hémisphères à une tâche, un dernier point est à relever : l'échange interhémisphérique. C'est un point qui pourrait nous éclairer sur la participation des deux hémisphères. Si le langage est majoritairement traité dans l'hémisphère gauche, une réponse motrice dans la main gauche est la suite d'un transfert interhémisphérique qui devrait démontrer un décalage par rapport à l'activité de la main droite selon les recherches de Ringo en 1994. De plus, ce décalage devrait diminuer en avançant en âge à cause de la maturation de la matière blanche, soit la myélinisation du corps calleux durant le développement de l'enfant (Gilliam et al., 2011; Toga et al., 2006).

Les objectifs pratiques de la compréhension du lien entre l'activité motrice et l'activité linguistique chez les enfants neurotypiques sont que les résultats pourraient servir de base pour ensuite étudier ce lien chez les enfants ayant des troubles langagiers et/ou des troubles moteurs dans le but d'identifier les possibilités d'inclure le mouvement pour aider à l'apprentissage du langage ou vice versa. Pour bien comprendre ce lien, on ne peut se limiter à l'activité motrice d'une main et sa représentation cérébrale d'un seul hémisphère.

CHAPITRE I

PROBLÉMATIQUE

1.1 Mes questions de recherche :

Suite à l'écoute d'un verbe d'action manuelle, y a-t-il chez l'enfant une modulation de l'activité motrice soit, ipsilatérale ou controlatérale à l'aire de Broca, ou les deux?

De plus, est-ce que cette modulation est similaire aux différents âges du développement de l'enfant?

1.2 Hypothèses :

La modulation de l'activité motrice à l'écoute d'un verbe d'action manuelle, détectée par un capteur de force, devrait être controlatérale à l'aire de Broca.

Dans le cas de modulations ipsilatérale et controlatérale, il devrait y avoir un décalage de l'activité motrice entre la main ipsilatérale et controlatérale à l'aire de Broca. À la maturation complète du corps calleux, le décalage devrait être d'environ 50 Msec (Ringo, Doty, Demeter, & Simard, 1994). Donc avant l'âge de 15 ans, le décalage devrait être supérieur à 50 Msec.

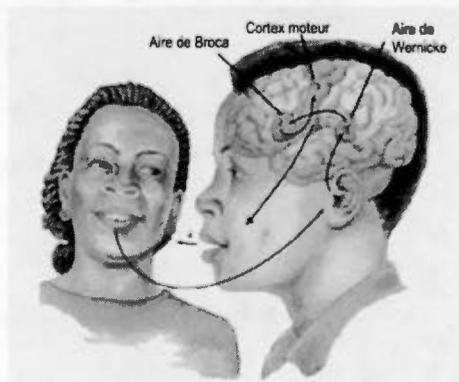
CHAPITRE II

REVUE DE LA LITTÉRATURE

2.1 Cerveau et langage

Le langage, moyen de communication de l'homme, se spécialise dans un hémisphère cérébral qui est majoritairement celui de gauche. Pour être plus précis, l'hémisphère gauche contrôle le langage chez 90% des droitiers et 70% des gauchers (selon le site : <http://lecerveau.mcgill.ca/>). Deux structures cérébrales gèrent les fonctions langagières. La première est l'aire de Broca et la deuxième est l'aire de Wernicke. Ces deux aires sont logées dans deux lobes différents du cerveau, soit le lobe frontal et le lobe temporal, et elles sont connectées par le faisceau de fibres nerveuses qui se nomme le faisceau arqué. Regardons plus précisément chacune des structures énumérées.

Figure 2.1 Modèle du langage selon Geschwind



2.1.1 Région de Broca

L'aire de Broca, située dans la région ventro-postérieure du lobe frontal, donne à l'homme la capacité de produire le langage. La découverte de celle-ci est liée aux aphasies étudiées par Paul Broca et Carl Wernicke. Une aphasie dans la région de Broca mène à un contrôle du contenu linguistique relativement faible, surtout lorsque l'on parle de la grammaire. Les phrases sont parfois incompréhensibles, des syllabes dépourvues de sens sont prononcées et les mots ne sont pas choisis dans le bon contexte (Purves et al., 2007).

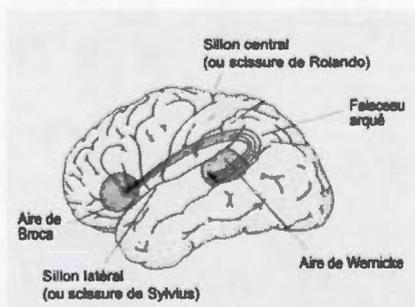
2.1.2 Région de Wernicke

L'aire de Wernicke est située dans la région postéro-supérieure du lobe temporal. Elle permet la compréhension du langage parlé. Une aphasie dans cette région mène à une incompréhension du langage sans pour autant nuire à la formulation syntaxique et émotionnelle de leur expression orale (Purves et al., 2007).

2.1.3 La communication entre Wernicke et Broca : le faisceau arqué

Le faisceau arqué est un faisceau de fibres nerveuses qui connecte l'aire de Wernicke et l'aire de Broca (Figure 2.2). Il suit un peu le chemin de la scissure de Sylvius dont les deux aires sont à chaque extrémité. Son rôle dans le langage, lors d'une discussion entre interlocuteurs, est de communiquer le sens de l'échange linguistique qui est décodé par l'aire de Wernicke vers l'aire de Broca qui elle, formule une réponse.

Figure 2.2 Faisceau arqué



Une aphasie du faisceau arqué, se nommant aphasie de conduction, se traduit comme suit : le patient comprend le message verbal, mais sa réponse est inadaptée à celui-ci. Un point qu'il ne faut pas négliger : l'arrivée du message verbal au cerveau n'est pas dans l'aire de Wernicke, mais vient de l'aire auditive primaire qui est ensuite transmise à l'aire de Wernicke.

2.1.4 Maturation des aires du langage

La maturation des deux aires suit le chemin suivant : Tout d'abord, on remarque une augmentation de l'épaisseur de ces régions d'environ 0,10 à 0,15 mm par année. Ce chiffre vient des données de Toga et al. 2006 sur des sujets entre 5 et 11 ans. Ceci veut dire qu'il y a une augmentation de la matière grise jusqu'à 11 ans. Cependant, entre 11 et 13 ans, une deuxième étape importante se produit, car il y a un amincissement de la matière grise en même temps qu'une augmentation de la matière blanche (les fibres nerveuses myélinisées). Ceci permet à chaque individu, se développant normalement, d'améliorer ses capacités linguistiques. L'aire auditive primaire, endroit par où commence le chemin cortical du langage parlé, se myélinise plutôt entre 4 et 8 ans.

2.2 Connexion interhémisphérique

2.2.1 Corps calleux

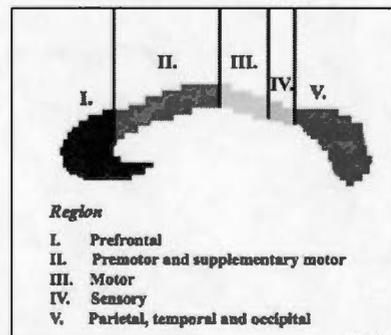
Figure 2.3 Corps calleux en coupe coronale



Le corpus callosum est la principale structure cérébrale qui permet l'échange d'informations entre les deux hémisphères cérébraux. On voit dans la figure 2.3 les fibres nerveuses reliant les deux

hémisphères. Vu la spécialisation des hémisphères, la circulation de l'information est importante dans la réalisation de la tâche motrice bilatérale. La section chirurgicale du corps calleux se traduit par une déficience de la coordination bimanuelle pour les mouvements synchrones ou alternés. Puis, chez les patients ayant une absence partielle ou totale du corps calleux à la naissance (agénésie du corps calleux), on observe généralement des déficits moteurs et des déficits cognitifs. Les déficits moteurs peuvent se présenter par exemple, tant sur la motricité globale que sur la motricité fine. La première étant une action qui engage tout le corps, comme la course, et la deuxième qui engage les mains, comme l'écriture.

Figure 2.4 Topographie du corps calleux



Les fibres nerveuses du corps calleux se dirigent vers différents endroits anatomiques du cerveau. La Figure 2.4 nous montre la cartographie du corps calleux. La partie à gauche est la partie antérieure et la partie de droite est celle postérieure. Les liaisons du lobe préfrontal sont à gauche, suivies du cortex prémoteur et l'aire motrice supplémentaire, de l'aire motrice primaire, de l'aire somesthésique primaire et de la partie la plus à droite où sont situées les liaisons de l'aire pariétale postérieure, l'aire temporale et l'aire occipitale. La maturation du corps calleux est rostro-caudal, soit de l'avant vers l'arrière. Mais, comme l'indiquent Gilliam et al. (2011), la partie avant qui gère les communications préfrontales myélinisées est celle qui se développe le moins rapidement par année. Le pourcentage de croissance augmente jusqu'à la quatrième partie du corps calleux, puis redescend pour la partie qui relie l'aire pariétale, l'aire temporale et l'aire occipitale (Figure 2.4). Nous voyons que les parties qui se développent le plus vite

sont celles de l'aire motrice et celles de l'aire somesthésique. Selon Toga, la vague rostro-caudale du développement du corps calleux est entre l'âge de 3 à 15 ans.

2.2.2 Délai de conduction interhémisphérique

Le délai de la conduction interhémisphérique est le temps calculé en milliseconde que l'information prend pour passer d'un hémisphère à l'autre. La formule ci-dessous permet de calculer le délai.

$$(2.1) \text{ Délai (Msec)} = \text{distance (mm)} / [\text{diamètre}(\mu\text{m}) * 8,7(\text{mm/Msec}/\mu\text{m})]$$

Premièrement, la distance est le trajet parcouru par un axone interhémisphérique. Le diamètre est la largeur de l'axone et le 8,7 est une constante de la vitesse de la conduction pour les fibres commissurales myélinisées (Ringo et al., 1994). Ces chercheurs ont analysé le potentiel évoqué sur le macaque pour connaître le délai interhémisphérique réel et l'ont estimé sur l'humain par la suite. L'expérimentation consistait à prendre un relevé de l'impulsion électrique dans les deux hémisphères suite à une stimulation visuelle dans un seul hémisphère du macaque. Sur celui-ci, l'estimation est de 25 à 30 Msec et l'extrapolation sur l'homme est d'environ 50 Msec de délai interhémisphérique dans la commissure antérieure, soit la partie avant du corps calleux.

2.3 Méthodes d'expérimentations antérieures

Concernant les liens entre le langage et la motricité, les travaux de Hauk, Johnsrude et Pulvermüller (2004) sont des incontournables. À l'aide de l'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle (IRMf), ils démontrent que les mots d'actions activent les aires motrices du cerveau en respectant la somatotopie de celui-ci. Ceci veut dire qu'un verbe exprimant une action manuelle active les aires du cerveau qui régissent le bras et la main chez l'humain. Même si l'IRMf est un excellent instrument de

recherche, il est également très dispendieux et il ne répond pas à la question suivante : Est-ce que l'activation des aires cérébrales, suite à l'écoute d'un mot d'action, laisse passer une efférence jusqu'à la main avant d'être inhibée? C'est alors que Bourbonnais et Frak publient (Bourbonnais et al. 2008) sur un capteur de force avec lequel ils testent les différentes positions des doigts durant la préhension. Le capteur de force (Figure 2.5) est à l'intérieur d'un cylindre (Figure 2.6) et il est capable de calculer la force sur les 3 axes: vertical, oscillation et préhension (horizontal) (X,Y,Z). Les résultats démontrent que la force est semblable, indépendamment de l'orientation de la prise. Plus tard, en 2010, le même cylindre est utilisé pour prouver qu'il y a une modulation de l'activité motrice de la main suite à l'écoute d'un verbe comparativement à l'écoute d'un nom. Les résultats mettent en évidence aussi que seul l'axe Z est nécessaire pour une prise de données fiables, car les résultats sont similaires avec ou sans les données des axes X et Y. Puis, après l'augmentation de la force à l'écoute d'un verbe, on remarque une diminution pour ensuite revenir à la courbe normale de force appliquée. Ceci est expliqué comme étant une inhibition de l'efférence motrice suite à un verbe, ce qui ne se produit pas à l'écoute de noms (Victor Frak et al., 2010). Ensuite, Aravena et al. en 2012 et 2014 utilisent un capteur similaire, mais sans le cylindre. Ils imposent une certaine force de préhension dans la majorité des expérimentations afin de calculer la différence de force selon le contexte linguistique. Ils utilisent des phrases incluant une action manuelle, des phrases négatives, des phrases positives sans verbe d'action manuelle, des phrases avec des pseudoverbes (sans référence au contexte : Avec son crayon noir, Paul grille le contrat) ainsi que des phrases intentionnelles d'action manuelle (ex. : Jean veut signer ce contrat). La méthodologie différente de Frak et al.(2010) ne leur permet pas de valider le concept d'inhibition suite à la stimulation auditive d'un verbe, mais elle met de l'avant ces résultats qui montrent que le contexte linguistique joue un rôle dans la force de prise. Les résultats de 2012 mettent en évidence qu'une phrase sans verbe d'action n'apporte aucune stimulation, contrairement à celle qui comporte un verbe d'action. Ses résultats témoignent aussi que la négation d'une phrase a un effet

sur la force de préhension qui est plus faible qu'à l'écoute des phrases positives avec un verbe d'action.

Figure 2.5 Capteur de force triaxiale

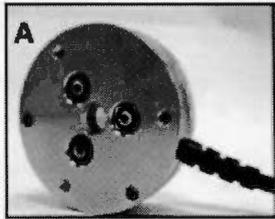
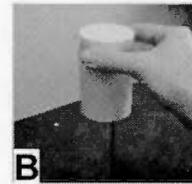


Figure 2.5 Cylindre avec capteur à l'intérieur



À ce jour, les méthodologies avec les capteurs de force varient d'une étude à l'autre, surtout concernant le traitement et leur analyse. C'est alors que la professeure Nazir publie un article en janvier 2016 sur la mise en place d'une méthodologie qui servira de standard dans les futures expérimentations. Étant donné que le professeur Frak est coauteur et collaborateur du travail permettant la publication, il nous a été possible de nous familiariser avec la méthodologie avant sa publication. Une partie de celle-ci a été appliquée dans ce projet, telle que l'analyse de MF rapide, considérée comme un mouvement de doigt (changement de 100 mN en moins de 100 Msec). Dans cet article, la méthode statistique de «Fast Fournier» a été appliquée pour déterminer les filtrages adéquats lors de l'analyse des MF.

Comme présenté au début de cette section, il n'y a pas que les capteurs de force qui permettent la recherche sur les liens entre le langage et la motricité. D'autres technologies permettent de mettre en évidence ce lien. Grâce à celles-ci, les aires cérébrales, qui jouent un rôle dans cette interaction, ont été mieux localisées. La technologie expliquée plus tôt, soit l'IRMf, a une grande précision spatiale, mais elle est très limitée dans le temps. Elle se compare à une photo prise avec un appareil

photo de grande qualité. Il y a aussi l'électroencéphalographie (EEG) et la magnétoencéphalographie (MEG) qui tracent l'activité électrique ou magnétique du cerveau. Ces technologies se comparent un peu plus à une caméra vidéo de basse qualité captant l'activité dans le temps, mais dont la localisation est moins précise. Les dernières technologies sont plus intrusives. La stimulation magnétique transcranienne (TMS) peut inhiber ou stimuler une partie précise du cerveau. En utilisant le potentiel évoqué moteur (PEM), il est possible de vérifier la différence de temps du transport de l'énergie électrique dans la main avec ou sans stimulation linguistique. Ce qui est très intéressant, par rapport à cette technologie, c'est qu'elle est sans effets secondaires et qu'une fois la TMS arrêtée, l'activité cérébrale redevient normale. La dernière technologie est la stimulation transcranienne par courant continu (tDCS). Elle est utilisée dans le but de rétablir l'activité cérébrale de régions endommagées. Citons comme exemple la région de Broca dans les recherches de Cattaneo, Pisoni et Papagno 2011.

Un peu plus proches des expérimentations avec le capteur de force, les études sur la cinématique observent les changements externes avec des appareils tels que des caméras ou un accéléromètre. Au lieu de la force de préhension, ces études mesurent la latence et l'amplitude des mouvements de la main à l'exécution d'une tâche suite aux stimulations linguistiques. Boulenger et al. (2006) voit dans ses résultats que le mot d'action peut faciliter ou perturber un comportement moteur, mais cela dépend de la relation temporelle entre l'exécution du mouvement et le moment quand le mot d'action est présenté à l'intérieur de la tâche. Lorsque le mot d'action était présenté avant le mouvement, il était facilitateur. Lorsqu'il était présenté pendant, il était perturbateur. Le problème de cette comparaison est que la première tâche est une tâche alternée, car on passe du traitement du stimulus à l'exécution d'une action. Alors que dans la deuxième tâche, le traitement est simultané, car le stimulus est traité pendant l'exécution d'une action. L'étude de Fargier et al. (2012) va réparer l'erreur de comparaison de Boulenger, alors que cette fois, c'est le participant qui

verbalise des mots d'action ou de non-action alors qu'il prend un objet, le déplace pour ensuite le déposer. Les résultats démontrent que la verbalisation de mots liés à l'action exécutée facilite le geste moteur, ce qui met de l'avant le lien entre le langage et les aires motrices.

2.4 Sémantique et simulation motrice

2.4.1 Sémantique et fenêtres d'accès lexicales

Derrière l'activation des aires cérébrales, des fonctions linguistiques et des fonctions motrices se cachent des processus cérébraux qui permettent la compréhension et l'exécution d'un mot ou d'un mouvement (stimulus visuel ou auditif). Le premier processus est la sémantique. La sémantique fait partie de l'étude de la linguistique. Pour la compréhension, on parle de la sémantique et de la syntaxe. La syntaxe est la compréhension du sens de la phrase par l'interaction entre les mots de celle-ci. La sémantique est plutôt le décodage de chacun des mots pour comprendre le sens de la phrase. C'est un système de codes ou de symboles. Ce système serait actif entre 200 et 400 Msec après le début de la stimulation d'un mot (code).

Friederici (2002) présente les phases du traitement sémantique qui ont été utilisées par Aravena et al. (2012, 2014) et Nazir et al. (2016) pour l'analyse statistique. La première phase, de 100 à 300 Msec, est l'identification de la forme du mot et de sa catégorie. La seconde phase, de 300 à 500 Msec, est le traitement de l'information sémantique et morphosyntaxique. La troisième, de 500 à 800 Msec, est le processus d'intégration au besoin de réanalyse et de réparation de l'information.

2.4.2 Simulation motrice

Le processus de traitement linguistique s'intègre dans la théorie d'«Embodied cognition» (Hauk & Tschentscher, 2013) ou cognition incarnée qui s'explique par les connaissances inscrites dans le corps. Le principe est que les gestes moteurs et les mots qui les définissent sont liés dans la compréhension de ceux-ci. De ce fait, le mot «scier» est lié au schème moteur du mouvement de scier. Ceci nous mène donc vers la simulation motrice. Jeannerod et Frak (1999) affirment que la simulation motrice et la réalisation d'une action motrice activent les mêmes régions du cortex cérébral. Donc, dans la théorie de la cognition incarnée, la compréhension du mot passe par la représentation mentale de l'action qui vient de l'information de la sémantique. En liant ces processus aux aires cérébrales, Ramayya, Glasser et Rilling 2010 ont émis un trajet de l'information à l'utilisation d'outils où les aires de Brodmann (BA) 21 et 37 envoient l'information sémantique de l'objet vers aIPL (BA 40) et vers la partie postérieure du lobe pariétal inférieur (BA 39). Le premier s'occupe de la planification de l'exécution (simulation motrice) et le deuxième donne de l'information sémantique quant à la préhension de l'objet. Le tout termine son chemin vers le lobe frontal qui inclut l'aire 6, l'aire de Broca (BA 44-45) et l'aire motrice primaire (M1 (BA 4)). La sémantique et la simulation jouent donc un rôle dans le langage et la motricité ainsi que dans le pont entre eux. Si on localise la sémantique et la simulation dans le cerveau, on parle du lobe pariétal et plus particulièrement du lobule inférieur. Pour la simulation motrice de la main, on parle de la région de la scissure intrapariétale antérieure (Tunik et al., 2007).

2.5 La préhension chez l'enfant

Forsberg et ses collaborateurs ont fait une analyse très élaborée de la préhension chez l'enfant qui parut en trois articles en 1991-92. Ils font ressortir les différences entre la préhension des enfants de moins de 1 an à 11 ans et celle des adultes.

L'adulte, lors de la préhension d'un objet avec la pince de précision (index et pouce), génère une force hautement automatisée et presque invariable lors de répétitions. La force générée n'excède pas celle nécessaire à outrepasser la gravité. Durant le maintien de l'objet, la force est stable. L'enfant de moins de deux ans génère beaucoup de force pour élever l'objet, plus que nécessaire, et plusieurs augmentations de la force sont présentes durant le maintien de l'objet, représentant des ajustements de la force. Plus l'enfant avance en âge, moins il génère de force à la préhension et moins il y a présence de réajustements dans la prise. Plus le développement avance, plus on retrouverait la présence de stratégies d'anticipation lors de la préhension. Ceci expliquerait le niveau de force à la limite du nécessaire chez l'adulte. Les enfants de plus de huit ans présentent une préhension plus stable, mais pas celle d'une maturité adulte.

CHAPITRE III

MÉTHODOLOGIE

Ce projet s'inspire d'une méthodologie de recherche nouvelle (Nazir et al. 2016), proposée pour la première fois sur une population d'enfants. Il exigeait beaucoup de réflexion et de modifications dans la méthodologie au fur et à mesure que le projet avançait. Malgré le travail de familiarisation, la mise en place d'un appareil portatif par le professeur Victor Frak, en collaboration avec les techniciens Robin Drolet et Carole Roy, nous a permis d'atteindre notre population cible à même leur milieu de fréquentation (les établissements scolaires). Le matériel portatif, la participation des enfants, la collaboration avec de nombreux acteurs du milieu scolaire, le traitement des données et l'analyse statistique ont demandé à l'équipe de travail de rester attentive à toutes les étapes du projet de recherche qui vous est présenté dans ce mémoire.

3.1 Participants

Au total, 35 enfants en milieu scolaire ont participé à notre expérimentation. 15 enfants entre 5 et 10 ans et 20 entre 13 et 17 ans. Pour le groupe d'adolescents (13 à 17 ans), les données de 6 sujets ne sont pas valides dû à des problèmes techniques lors de l'enregistrement des données. En vérité, nous comparons un groupe de 15 enfants à un groupe de 14 adolescents. La moyenne d'âge du groupe d'enfants est de 7,4 ($\sigma = 1.6$) et celle du groupe d'adolescents est de 14,8 ($\sigma = 1.5$). Tous les participants sont des élèves sur le territoire lavallois fréquentant la commission

scolaire de Laval et une école privée. Le groupe d'enfants (5 à 11 ans) fréquente l'école primaire Saint-François. Les participants adolescents sont issus de deux écoles. Les élèves de 13 et 14 ans sont à l'école privée Letendre et les élèves de 15 à 17 ans sont issus de l'école secondaire Horizon Jeunesse. Les six participants dont les données étaient non valides sont des élèves de l'école secondaire l'Odyssée des Jeunes. Cette école gère le premier cycle du secondaire et les élèves continuent au deuxième cycle à l'école Horizon Jeunesse. À la suite de ces six sujets, nous avons dû changer d'école pour trouver des participants en raison de l'organisation du calendrier scolaire de cette école. C'est pour cette raison que du recrutement a été fait à l'école Letendre.

La sélection des participants a été gérée par l'administration de chaque école. Les critères de sélection leur ont été partagés par écrit : les participants devaient être droitiers, francophones unilingues, n'ayant aucun trouble d'apprentissage ou d'adaptation et aucun antécédent médical neurologique. Pour les élèves du secondaire qui ont tous des cours d'anglais obligatoires, le critère de la langue maternelle était qu'ils ne fassent pas partie des groupes ayant des cours d'anglais enrichis. La participation étant durant les heures de classe, l'administration et les enseignants sélectionnaient les élèves n'ayant aucun retard ou difficulté en classe.

Lors de séances d'expérimentations, les informations retenues sur les participants étaient leur date de naissance, la date de passation de l'expérimentation, le pourcentage de droiterie en référence au test d'Edinburgh (Oldfield, 1971), la langue maternelle, la langue parlée à l'école et la langue parlée pour jouer. Le document d'identification des sujets est à l'Appendice A.2.

Ce projet a reçu l'approbation du comité d'éthique de la recherche pour les projets étudiants impliquant des êtres humains (CERPÉ) de l'UQAM. Il a aussi reçu celle du comité de la recherche des Services éducatifs, secteur jeune de la commission scolaire

de Laval ainsi que de la direction des écoles. Pour la participation de chaque enfant, un consentement parental était exigé (Appendice A.3). Aucune compensation financière n'a été donnée, mais en remerciement de leur participation, les participants recevaient une collation sans allergène tels que des barres tendres et un jus de fruit.

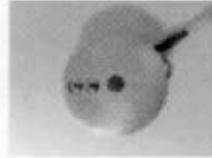
3.2 Matériels d'expérimentation

3.2.1 Matériels physiques

Figure 3.1 Matériel portatif

Le capteur de force visible à la figure 3.2 est uni-axial, choix fait selon les résultats de Frak et al. 2010. Il est fait avec deux rondelles d'aluminium de 5 cm de diamètre vissées à lui, ce qui donne 1,8 cm d'épaisseur. Le capteur peut supporter une pression allant jusqu'à 1 kilogramme. L'amplitude du signal de sortie est de $1,0 \pm 10\%$ mV/V. L'erreur de linéarité et l'hystérésis sont de 0,02% (sur l'échelle totale). L'échelle de compensation en température est de -10 degrés C° à 40 degrés C°. Le capteur est branché sur un amplificateur Honeywell DV10L. C'est l'amplificateur qui permet de calibrer le capteur. Celui-ci est branché à une carte d'acquisition. Sur la même carte d'acquisition est aussi connecté l'amplificateur de son. L'amplificateur est une console de son HENYX802 de Behringer et les écouteurs MDR-7502 de Sony (gamme professionnelle) servent à l'écoute des listes de mots. Le signal sonore est généré par l'ordinateur connecté à la console de son. La carte d'acquisition est finalement connectée à un ordinateur utilisant un système d'exploitation de Microsoft.



Figure 3.2 Capteur de force uniaxiale

3.2.2 Logiciels et matériel numérique.

Les données transmises en 1 kHz de la carte d'acquisition à l'ordinateur sont traitées par le logiciel DasyLab 11.0. Le logiciel filtre les données avec les filtres suivants : 10 Hz with fourth zero, low pass butter worth filter et notch filter 50 hz. Les données sont enregistrées en ASCII que l'on transforme en XLS et qui sont par la suite normalisées et compilées dans le logiciel Excel de Microsoft. Une fois compilées, les données ont été analysées dans le logiciel SPSS d'IBM (V.22). Le traitement et l'analyse statistique seront présentés dans les parties 3.4 et 3.5.

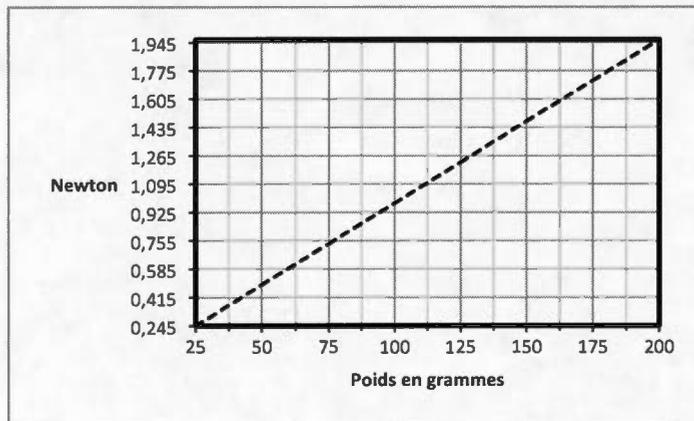
Les stimuli auditifs sont des mots d'action et de non-action. Les mots d'action sont tous des verbes d'action manuelle et les mots de non-action sont des noms n'ayant aucune sémantique liée à une action manuelle. Par exemple, le mot tempête, on ne peut pas s'imaginer prendre une tempête dans ses mains. 35 noms et 35 verbes uni, bi ou trisyllabiques ont été sélectionnés à l'aide d'un dictionnaire de fréquences (voir l'Appendice A.4.1) (New, Pallier, Ferrand, & Matos, 2001). L'enregistrement des mots a été fait par un homme et chacun des mots avait été enregistré individuellement. À l'aide des mots préenregistrés, 40 listes de mots ont été faites à l'aide du logiciel Audacity 2.0.3. Pour faire les listes, 5 verbes, qui font partie du quotidien des enfants, ont été sélectionnés parmi nos 35, soit les verbes : colorier, découper, gratter, pincer et prendre. Pour la sélection des mots de non-action, les noms qui ne commençaient pas par les mêmes syllabes que les verbes ont été sélectionnés. C'est donc les mots suivants qui ont été retenus : requin, tempête, avion, étoile et licorne. Pour chacun des mots, 4 pistes audio avec le mot cible qui se répète 10, 11 ou 12 fois ont été produites. Le mot cible était mélangé avec les 35 noms, ce qui donnait des pistes entre 45 et 47 mots ayant une seconde de silence entre chaque

pour une durée de 70 à 80 secondes. L'ordre des mots dans les pistes sonores était semi-aléatoire. Le mot n'était jamais présenté deux fois d'affilée, il ne se présentait pas avant le 3^e mot et il n'était jamais le dernier mot de la liste.

3.2.3 Calibrage

La calibration du capteur de force, pour transformer les données transmises en Volt en Newton, se fait en partie physiquement sur l'amplificateur et en partie informatiquement dans le logiciel DasyLab. La première étape est de s'assurer que le capteur est bien à zéro lorsqu'il est à la verticale sur la table. Il est important de noter qu'en calibrant le zéro ici, on doit faire abstraction du poids du capteur lui-même. La calibration affichée sur le logiciel DasyLab se fait manuellement sur l'amplificateur. La deuxième étape se fait mathématiquement dans le logiciel DasyLab. Cette fois, nous devons soustraire à l'horizontale le poids du capteur. La valeur en Volt du poids du capteur est soustraite pour avoir une valeur de zéro. Un poids de 100g est déposé sur chaque capteur pour ensuite diviser le résultat en Volt par le 0,1 kg. Cela donne la valeur en kg de 1 Volt. Il ne reste plus qu'à transposer les grammes en Newton ($F=ma$, $9,81 = \text{accélération}$). La dernière étape est la validation de la calibration avec la vérification de la constance du gain en Newton. Pour faire cette vérification, 4 poids sont utilisés, soit 25g, 50g, 100g et 200g, ce qui équivaut en Newton à 0,2451N, 0,4904N, 0,9807N, 1,9614N (Figure 3.3). Si ces chiffres ne sont pas similaires au centième près, la calibration recommence du début.

Figure 3.3 Calibration des capteurs de force : courbe de tendance linéaire



3.3 Protocoles d'expérimentation

3.3.1 Conditions d'expérimentation

L'expérimentation s'est passée dans un local mis à notre disposition par chaque école. Nous avons demandé un local tranquille n'ayant aucun bruit autour. Les conditions d'expérimentation n'étaient pas identiques d'une école à l'autre. À l'école Letendre, nous étions dans la bibliothèque. L'endroit était très calme et le peu de mouvements dans la bibliothèque n'a pas dérangé nos participants. À l'école Horizon Jeunesse, nous avons fait une partie des expérimentations à la bibliothèque et l'autre dans la salle de réunion de l'administration. Il n'y avait pas de différence dans l'attention des participants que nous vérifions par le biais de notre protocole qui sera expliqué ci-dessous. L'école Saint-François est celle qui nous a accordé le local le moins tranquille. Si une partie des expérimentations était dans un bureau de la direction très tranquille, les expérimentations en avant-midi étaient dans une salle connectée à la salle à manger. Parfois, des élèves y circulaient ainsi que des membres du personnel. Cependant, durant l'expérimentation, les participants avaient les yeux fermés et les écouteurs coupaient les sons ambiants. De plus, nous avons organisé l'environnement de façon à ce que les mouvements dans la salle adjacente ne soient pas dans le champ visuel du participant. Ainsi, malgré le risque de distraction, les enfants étaient très attentifs (vérification faite dans le protocole) lors des expérimentations.

3.3.2 Protocole

Selon l'école, les participants étaient reconduits à notre lieu d'expérimentation ou nous devions aller les chercher au début de leur cours. Suite à la présentation des expérimentateurs, le participant recevait les explications concernant le déroulement de la séance. L'expérimentation débutait par la passation du questionnaire

d'Edinburgh pour vérifier le pourcentage de droiterie. Pour les plus jeunes, nous avons utilisé des objets pour ceux qui étaient incertains de leur préférence manuelle, en lien avec les items du questionnaire, afin de la vérifier en leur faisant exécuter les mouvements.

Ensuite, le participant s'installait, assis sur une chaise, ajustée à sa grandeur, devant une table. Sur la table se trouvait le capteur ainsi qu'un tapis en mousse sur lequel l'enfant y posait ses avant-bras pour prendre le capteur de force d'une main. Les explications suivantes étaient données au participant : il devait écouter la piste sonore les yeux fermés et compter silencieusement le nombre de fois que le mot cible revenait, tout en maintenant le capteur de force en pince tridigitale (index, majeur et pouce). Lors de la prise du capteur, l'avant-bras de la main qui tenait le capteur était appuyé sur le tapis. La main était appuyée sur le même tapis en position neutre et le capteur était maintenu en l'air par la pince tridigitale. Le bras inactif devait être sur la table placé selon le confort du participant, sans contact avec le bras utilisé (figure 3.4).

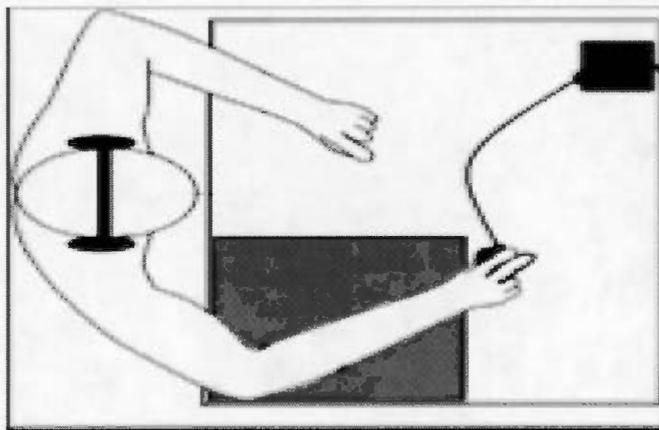


Figure 3.4 Organisation de l'environnement du participant

Un exemple de la prise de l'objet a été fait avant la première séance et une vérification était faite à chacune des séances afin de s'assurer que le participant avait

une prise adéquate. Avant que le participant ne prenne le capteur de force, le participant devait expliquer ou exécuter le mot cible. Le mot cible est un mot qui se répète entre 10 et 12 fois selon la piste sonore. Les verbes étaient vérifiés par une exécution du verbe cible par l'enfant avec ses deux mains. Les enfants avaient donc à colorier deux cercles, découper une feuille à l'aide de ciseaux, prendre une bouteille, se gratter le bras ou se pincer doucement la peau de la main. Pour les noms, une vérification verbale de leur connaissance des mots était faite. Il leur était demandé la signification des mots par des questions. Pour licorne et requin, la question demandait si le participant en avait déjà vu en vrai. Pour tempête, il devait de donnée des exemples de tempête (tempête de neige, tempête de sable). Pour avion, l'enfant devait dire s'il était déjà monté dans un avion auparavant et si oui, pour aller où. Pour étoile, la question était : Quand est-il possible de voir les étoiles ? Une fois cette vérification faite, le participant devait s'installer et prendre le capteur. La main de la première séance était choisie au hasard et par la suite, le participant alternait de main. Ainsi, nous évitions le risque de fatigue à l'utilisation répétée d'une main en particulier. Lorsque le participant était bien positionné, il devait appliquer une force de préhension de 1,5 N. et s'ajuster selon les consignes de l'expérimentateur. Ainsi, tous les participants débutaient avec le même niveau de force. Le participant maintenait sa prise et n'appliquait aucune autre pression volontaire sur le capteur durant la séance. Une fois l'écoute terminée, le participant devait dire aux évaluateurs le nombre de fois que le mot cible avait été répété dans la liste. Ceci était un indicateur du niveau attentionnel de l'enfant. Pour que l'essai soit bon, l'enfant devait avoir compté 70% des mots cibles (7/10 ou 8/12). La piste sonore était d'une durée de 1 minute et 15 secondes \pm 5 secondes . Le participant déposait le capteur et pendant qu'un expérimentateur commençait les explications de la prochaine séance (la main, le mot cible et les questions de vérification), l'autre préparait l'enregistrement des données et la présentation du prochain stimulus. Cela laissait 1 à 2 min de repos au participant. De plus, entre chaque séance, l'un des expérimentateurs entretenait la conversation pour savoir si tout allait bien et il encourageait le participant à continuer. Au total, le

participant écoutait 8 pistes sonores et l'expérimentation durait de 30 à 40 minutes. Pour chaque main, deux séances avaient des noms comme mot cible et de même pour les verbes. L'ordre de passation des listes était aléatoire. Il était important, pour éviter l'anticipation de l'enfant, d'expliquer les détails de l'analyse des résultats après celle-ci. Ainsi, le sentiment d'échec que l'enfant pouvait développer en souhaitant bien faire l'expérimentation et augmenter son niveau de force dans l'une des conditions pour plaire ou réussir était évité.

Cette expérimentation ne présentait aucun risque pour l'enfant parce que les mots écoutés étaient des mots utilisés fréquemment et qu'aucun des mots choisis n'était vulgaire ou péjoratif. Le volume dans les écouteurs était ajusté avec chaque participant. Pour ce qui est de l'effort fourni lors de l'expérimentation, il était plutôt de valeur négligeable, car le capteur ne pesait que 55g, ce qui équivaut au poids moyen d'un œuf. Un tapis a été installé pour assurer le confort de la position des avant-bras. Comme expliqué plus tôt, des pauses étaient prévues pour éviter la fatigue des participants.

3.4 Traitement des données

Pour compiler et traiter les données, elles ont été découpées des enregistrements de chacune des conditions. Pour chaque mot cible, les données étaient découpées de 300 Msec avant le stimulus et à 1000 Msec après. Au total, 1300 données pour chaque séquence sont utilisées pour faire les graphiques. Pour le traitement et l'analyse statistique, la fenêtre de temps de -200 à 0 Msec et de 100 à 800 Msec a été utilisée. Une fois les données compilées par condition : le nom de la main droite (ND); le nom de la main gauche (NG); le verbe de la main droite (VD); le verbe de la main gauche (VG), il y a entre 20 et 24 séquences de données par condition.

Le traitement des données est une normalisation par la force préstimulus. Pour chaque extrait de données, la moyenne de la force est faite entre -200 et 0 Msec. Ensuite, cette moyenne est soustraite à chacune des 1300 données. Il devient alors juste de parler de modulations dues au stimulus étant donné que les données ont été normalisées par la force préstimulus. De cette façon, le zéro est équivalent pour tous les extraits, tous les essais, toutes les conditions ainsi que tous les sujets. Les données sont compilées après la soustraction des données aberrantes (section suivante). Pour l'analyse statistique, les fenêtres d'accès lexical de Friederici (2002) seront utilisées. Ces trois fenêtres utilisées dans les articles de Aravena (2012, 2014) et de Nazir (2015) étaient de 100 à 300 Msec (identification forme et catégorie du mot), de 300 à 500 Msec (traitement de l'information sémantique et morphosyntaxique) et de 500 à 800 Msec (processus d'intégration). Cependant, pour répondre à l'hypothèse d'un délai interhémisphérique, les données ont été compilées par tranche de 50 Msec au lieu de 200 et 300 Msec. Il y a donc la moyenne de la force de 100 à 150 Msec, 150 à 200 Msec, ainsi de suite jusqu'à 800 Msec.

3.4.1 Données aberrantes.

Les critères d'exclusion de Nazir, Hrycyk, Frak et al. (2016) ont été utilisés afin de supprimer les séquences de données aberrantes et au besoin des sujets dont la majorité des données étaient aberrantes. Nous supprimons les séquences ayant des modulations dépassant 100 mN à l'intérieur de 100 Msec et ceci durant la fenêtre d'analyse statistique de 100 à 800 Msec. De plus, les séquences dépassant deux écarts-types de la moyenne compilée par condition ont été supprimées. Un participant était exclu de l'analyse statistique lorsque moins de 70% des données restaient après la suppression des séquences invalides. Deux participants du groupe d'adolescents et deux participants du groupe d'enfants ont été exclus.

Une méthode supplémentaire a été utilisée pour supprimer les données aberrantes : le Thompson Tau modifié. Étant donné la variabilité de la force de préhension de l'enfant et le nombre de participants relativement peu élevé, un participant ayant une moyenne plus forte que les autres affectait facilement la moyenne du groupe. Ainsi, nous avons fait un test statistique de données aberrantes. Ce test statistique permet de trouver une donnée aberrante en utilisant une table à laquelle on compare nos données avec l'aide de la moyenne et de l'écart-type du groupe.

$$(3.1) \text{Données aberrantes} = |x - \bar{x}| > \text{Tau} * \sigma$$

La valeur Tau était calculée selon la formule suivante :

$$(3.2) \text{Tau} = \frac{t*(n-1)}{\sqrt{n*\sqrt{n-2+t^2}}}$$

La valeur t est la résultante de la fonction « LOI.STUDENT.INVERSE » d'Excel avec un alpha de 0,05 et d'un degré de liberté de $n-2$.

Pour chaque fenêtre de 50 Msec, le Thompson Tau modifié a été appliqué. Le nombre de fenêtres aberrantes par condition était comptabilisé et lorsque plus de 40% d'une condition était aberrants, le sujet était exclu de l'analyse statistique. Au total, 2 participants ont été exclus du groupe d'enfants et 4 du groupe d'adolescents. En ordre décroissant, les conditions dans lesquelles nous trouvions le plus de données extrêmes étaient dans le verbe gauche, le nom droite et le nom gauche.

3.5 Analyses statistiques

Les analyses statistiques ont été faites sur la version 22 du logiciel SPSS de IBM. Il y a eu deux analyses différentes des données. La première est une comparaison de la moyenne de chaque condition pour chaque groupe par rapport à la ligne de base et la seconde est une ANOVA à mesure répétée suivie d'un test de comparaison multiple (post hoc). Ces deux analyses se font séparément dans le but d'apporter un regard complémentaire sur la réponse motrice suite aux stimuli.

Une précision importante sur la comparaison de l'activité interhémisphérique dans la littérature : il est commun de traiter de la question en regardant les effets intrasujets, mais le nombre de stimuli par condition ne permettait pas d'avoir un effet assez fort pour qu'il soit représentatif. Il était donc préférable de ne se concentrer que sur l'effet de groupe.

3.5.1 Comparaison à la ligne de base

La première analyse est un test-t qui compare chacune des moyennes pour chaque groupe à une valeur fixe qui est de zéro. Nous avons 4 moyennes par groupe, le nom de la main droite (ND), le nom de la main gauche (NG), le verbe de la main droite (VD) et le verbe de la main gauche (VG). La valeur zéro vient du fait que les données ont été normalisées par la moyenne préstimulus comme expliqué dans la section précédente. Donc, les 14 moyennes de chaque condition pour les deux groupes ont été comparées à zéro.

3.5.2 ANOVA à mesure répétée

La deuxième analyse statistique est une ANOVA à mesures répétées à 4 facteurs, 3 facteurs intragroupes et 1 facteur intergroupe. Les trois facteurs sont les mains (droite et gauche), les mots (nom et verbe), et les fenêtres qui sont 14 moyennes de 50 Msec (de 100 à 800 Msec). Un post hoc LSD (least significance difference) a comparé les moyennes entre tous les facteurs. Aucune correction de l'alpha n'a été appliquée parce que seuls les effets simples étaient comparés par le post hoc. Dû aux comparaisons appariées par facteur, certaines comparaisons n'ont pas été faites avec notre modèle statistique, soit VD comparé à NG et le ND comparé à VG. Ces comparaisons n'étaient pas nécessaires pour répondre à l'hypothèse de recherche.

CHAPITRE IV

RÉSULTATS

Ce chapitre inclut trois sections. Premièrement, il sera question de la comparaison des moyennes à la ligne de base. Deuxièmement, les comparaisons des moyennes inter et intra groupes seront présentées. Troisièmement, une analyse des graphiques sera faite. Cette dernière sert à mettre de l'avant les aspects importants qui ressortent d'une analyse qualitative des courbes de chaque condition pour chaque groupe comme information complémentaire aux analyses statistiques avant la discussion.

4.1 Comparaisons des moyennes à la ligne de base.

Voici les 14 moyennes, représentant les MF de 100 à 800 Msec par condition, comparées à la ligne de base (la valeur 0) pour les deux groupes. Pour simplifier la lecture des résultats, ceux-ci sont présentés dans le tableau ci-dessous. Seuls les résultats significatifs et la valeur P sont présentés. Étant donné que le seuil de la valeur P est significatif à 0,05, seuls les résultats égaux ou inférieurs sont présentés dans les tableaux de la discussion. Vous trouverez dans l'Appendice B les résultats complets.

En premier lieu, analysons les résultats du groupe d'enfants. Lorsque le verbe est entendu, il n'y a pas de résultats significatifs, alors que le capteur est maintenu avec la main droite. Ceci veut dire qu'il y a peu de modulations de la force (MF). Les résultats de la main gauche à l'écoute du verbe présentent des MF négatives, soit en dessous de la ligne de base. Elles sont significatives de 100 à 450 Msec. Les résultats

de la main gauche à l'écoute du nom sont similaires au verbe. Ils sont significativement négatifs de 100 à 600 Msec. Le seul résultat positif comparativement à la ligne de base est celui des MF de la main droite à l'écoute du nom. De 100 à 200 Msec, les MF sont négatives, mais de 650 à 800 Msec, elles sont positives.

En second lieu, analysons les résultats du groupe d'adolescents. Les MF de la main droite en écoutant le verbe sont positives de 300 à 800 Msec. De la même main, les MF à l'écoute du nom sont positives de 450 à 750 Msec. Avec la main gauche, les MF, lors de l'écoute du verbe, sont positives de 650 à 750 Msec et lors de l'écoute du nom, sont négatives de 100 à 150 Msec.

Tableau 4.1 Résultats des MF comparées à la ligne de base

Conditions	Enfants	Modulations significatives	Adolescents	Modulations significatives
ND	P<0,01 de 100 à 200 Msec	Négative	P<0,01 de 450 à 500 Msec	Positif
	P<0,05 de 650 à 800 Msec	Positive	P<0,05 de 700 à 750 Msec	Positif
NG	P<0,05 de 100 à 600 Msec	Négative	P<0,05 de 100 à 150 Msec	Négatif
VD	N/A	N/A	P<0,05 de 300 à 800 Msec	Positif
VG	P<0,05 de 100 à 450 Msec	Négative	P<0,05 de 650 à 750 Msec	Positif

4.2 Comparaisons des moyennes inter et intra groupes

4.2.1 Résultats de l'ANOVA à mesures répétées

Le test de Mauchly indique que la sphéricité n'a été remplie que pour les facteurs et interactions suivants: le facteur fenêtre ($\chi^2(90)=560,926$ avec $p<0,001$), l'interaction mot*fenêtre ($\chi^2(90)=391,012$ avec $p<0,001$), l'interaction main*fenêtre ($\chi^2(90)=526,797$ avec $p<0,001$) et l'interaction mot*main*fenêtre ($\chi^2(90)=433,805$, $p<0,001$). Cependant, le degré de liberté a été corrigé en utilisant l'estimation de la

sphéricité de Greenhouse-Geisser ($\epsilon = 0.134$ pour l'effet fenêtre, 0.157 pour l'effet mot*fenêtre, 0.104 pour l'effet main*fenêtre et 0.160 pour mot*main*fenêtre).

L'interaction quadruple (Mots*Mains*Fenêtres*groupes) est significative, $P < 0.001$ avec un $F(2,082, 35,402) = 10.494$. L'interaction étant significative, les effets principaux ne sont pas interprétés, étant donné que les effets simples sont vérifiés en décortiquant les interactions.

4.2.2 Résultats du post hoc LSD

Ayant une interaction quadruple significative, un post hoc LSD a été fait pour tous les facteurs. Regardons les effets simples de chaque variable lorsque les autres sont fixes. Tout comme les comparaisons avec la ligne de base, seuls les résultats significatifs sont présentés ici. Les résultats complets se trouveront dans l'Appendice B.

4.2.2.1 Différences entre les groupes :

Tableau 4.2 **Post hoc LSD, comparaisons inter-groupes**

Conditions	Comparaisons significatives dans le temps	Groupe supérieur
ND	N/A	N/A
NG	$P < 0,05$ de 200 à 250 Msec	Adolescents
	$P < 0,05$ de 400 à 700 Msec	Adolescents
VD	$P < 0,05$ de 350 à 800 Msec	Adolescents
VG	$P < 0,05$ de 100 à 450 Msec	Adolescents

Ce tableau permet de voir lequel des groupes a les MF les plus fortes. Dans toutes les conditions, à l'exception de ND, le groupe d'adolescents a des MF plus fortes que le groupe d'enfants. Cependant, les fenêtres significatives ne sont pas les mêmes pour toutes les conditions.

4.2.2.2 Différences entre les mains :

Tableau 4.3 Post hoc LSD, comparaisons intra-groupe du facteur Mains

Condition	Enfants	Main supérieure	Adolescents	Main supérieure
N	P<0,05 de 200 à 300 Msec	Droite	N/A	N/A
	P<0,05 de 350 à 800 Msec	Droite		
V	P<0,05 de 100 à 450 Msec	Droite	P<,05 de 500 à 650 Msec	Droite

Ce tableau permet de voir la main qui déploie les MF les plus fortes par rapport au stimulus et au groupe. Les chiffres démontrent que la main droite déploie plus de force, peu importe le stimulus chez les enfants alors que seuls les stimuli verbaux font ressortir une différence intermanuelle chez les adolescents. La comparaison du nom pour le groupe d'enfants compte deux résultats parce que la fenêtre 300 à 350 Msec n'est pas significative avec une valeur P de 0,056. Étant supérieur de peu, il est convenable de considérer la différence en continu de 200 à 800 Msec entre ND et NG chez l'enfant.

4.2.2.3 Différences entre les mots :

Tableau 4.4 Post hoc LSD, comparaisons intra-groupe du facteur Mots

Conditions	Enfants	Mot supérieur	Adolescents	Mot supérieur
D	P<0,01 de 500 à 800 Msec	Nom	P<0,05 de 400 à 700 Msec	Verbe
G	N/A	N/A	N/A	N/A

Ce tableau nous montre le mot qui fait déployer le plus de force selon la main et le groupe. Dans les deux groupes, aucun mot ne fait déployer une force significativement différente pour la main gauche. Cependant, pour la main droite, un mot amène une MF plus forte, mais ce n'est pas le même mot pour les deux groupes. Pour les enfants, les noms font déployer plus de force alors que pour les adolescents ce sont les verbes.

4.2.2.4 Différences entre les fenêtres :

Tableau 4.5 Post hoc LSD, comparaisons intra-groupe du facteur Temporel.

Conditions	Enfants	Modulations significatives	Adolescents	Modulations significatives
ND	P<0,05 de 450 à 700 Msec	Positive	P<0,01 de 450 à 500 Msec	Positive
NG	N/A	N/A	P<0,05 de 350 à 500 Msec	Positive
VD	P<0,05 de 700 à 800 Msec	Négative	P<0,01 de 150 à 200 Msec	Positive
			P<0,05 de 350 à 550 Msec	Positive
VG	P<0,05 de 150 à 200 Msec	Négative	N/A	N/A
	P<0,05 de 450 à 500 Msec	Positive		

Le dernier tableau nous présente les MF importantes qui se sont produites dans chacune des conditions pour les deux groupes. L'analyse a été faite ainsi : chaque fenêtre a été comparée avec celle précédente. Donc, la moyenne de la fenêtre 150 à 200 Msec a été comparée à la moyenne de la fenêtre 100 à 150 Msec et ceci est répété

à 13 reprises. Les augmentations ou diminutions importantes sont donc statistiquement significatives. Ce tableau enrichi grandement l'analyse avec la ligne de base.

Premièrement, les adolescents ne produisent que des modulations significativement positives alors qu'il y a des diminutions importantes de la force pour les conditions avec la main gauche chez les enfants. Également, l'augmentation importante de la force chez les deux groupes pour le ND est au même moment, soit 450 Msec après le stimulus. En lien avec l'absence de modulations significatives en comparaison avec la ligne de base (Tableau 4.1), il n'y a pas de modulation importante pour le VD chez l'enfant. Pour le même groupe, on peut aussi voir une petite élévation de la force à 450 Msec, suite à l'écoute du verbe de la main gauche. Finalement, chez les adolescents, le résultat le plus captivant est l'augmentation importante de la force à partir de 150 Msec après le stimulus verbal.

4.3 Analyse des graphiques

Si les statistiques nous expriment les différences significatives par fenêtre, les données sur les MF sont tout de même en continu et certains phénomènes importants ne sont pas visibles avec les analyses que nous avons faites. Les graphiques seront analysés comme les statistiques. Les faits marquants sur les courbes seront présentés pour ensuite être expliqués à l'aide des statistiques dans la discussion.

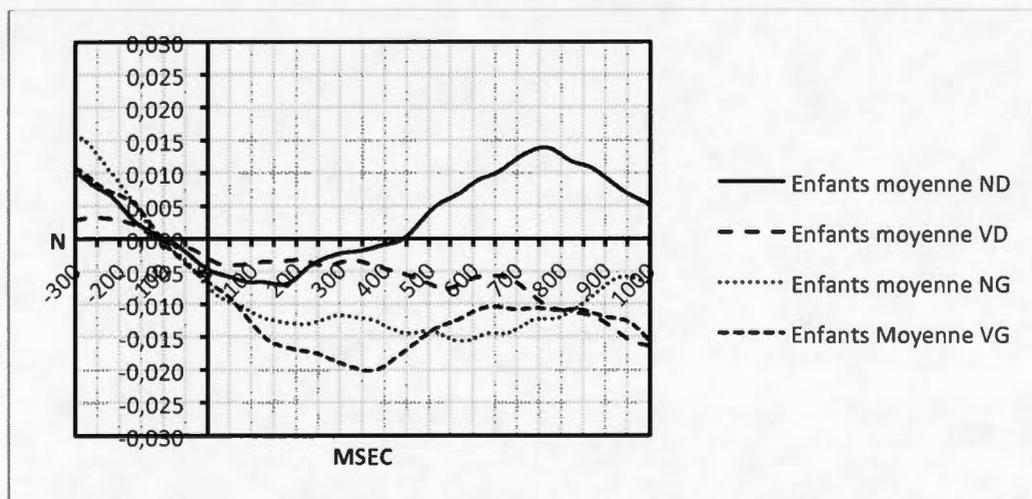
4.3.1 Analyse des MF des enfants

L'analyse qui suit se fera à l'aide de la figure 4.1 ci-dessous. Tout d'abord, dans tous les cas, la force diminue après la moyenne préstimulus. Par la suite, il y a de grandes différences entre les courbes de chaque main. La main droite, qui occupera une partie importante de la discussion, sera tout d'abord analysée. Pour le VD, la force est

légèrement dans le négatif, mais il y a peu de MF jusqu'à 350 Msec où elle commence à diminuer avec une très faible inclinaison. La diminution n'est pas significative avant 700 Msec (Tableau 4.5). La seule modulation positive est pour le ND. Comme les autres, la force est en diminution après la moyenne préstimulus, mais une augmentation débute après 150 Msec. La courbe de la force a une inclinaison faible jusqu'à 450 Msec où la force monte en flèche jusqu'à 750 Msec. Cette forte augmentation à 450 Msec est statistiquement prouvée dans le tableau 4.5.

Pour la main gauche, la force diminue d'une façon importante dans les deux conditions (NG et VG) et les résultats démontrent qu'après 100 Msec, les deux conditions sont significativement négatives par rapport à la ligne de base (Tableau 4.1). Pour la condition NG, la force diminue jusqu'à 600 Msec, moment à laquelle la force augmente avec une inclinaison similaire à sa diminution. La condition VG présente la diminution de la force la plus importante et la plus rapide qui dure jusqu'à 400 Msec pour ensuite augmenter rapidement. Augmentation significative vue dans le tableau 4.5. Pour la main gauche, on remarque aussi que les deux courbes sont déjà en phase descendante avant le début du mot.

Figure 4.1 MF du groupe d'enfants

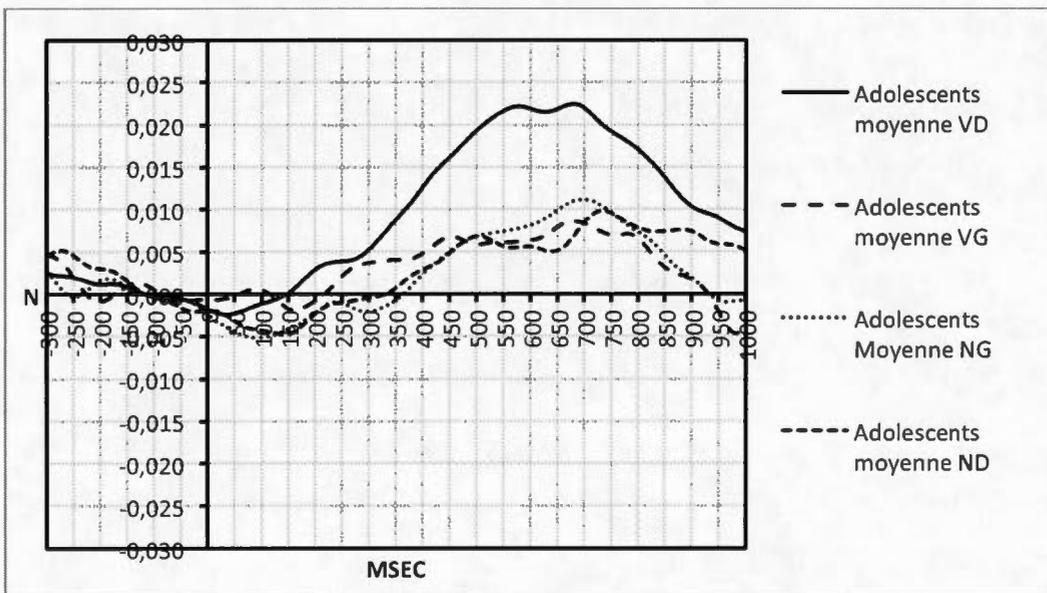


4.3.2 Analyse des MF des adolescents

Comme l'analyse du groupe d'enfants, celle-ci se fera à l'aide de la figure 4.2 ci-dessous pour le groupe d'adolescents. Toutes les conditions présentent des MF supérieures à la ligne de base, contrairement aux enfants. Le résultat le plus frappant est l'augmentation de la force suite à l'écoute du verbe avec la main droite. À partir de 50 Msec, la force commence une augmentation lente, mais une seconde augmentation de la force plus importante est présente (Tableau 4.5) à 150 Msec et une troisième apparaît après 250 Msec jusqu'au pic de 22 mN à 550 Msec. Rappelons-nous qu'après 300 Msec, les MF sont significativement plus fortes que la ligne de base (Tableau 4.1).

La condition VG présente une augmentation similaire et presque simultanée à VD à 150 Msec. Cependant, l'augmentation faiblit au même moment que celle du VD augmente de façon importante, soit après 250 Msec. La légère augmentation continue jusqu'à 650 Msec pour ensuite aller en diminuant.

Figure 4.2 MF du groupe d'adolescents



Les courbes de la condition nom de la main droite et de la main gauche des adolescents sont très similaires. Les deux ont une augmentation après 100 Msec et c'est après 300 Msec que leurs courbes de la force sont plus prononcées. Les deux atteignent leur pic à 700 Msec. La différence entre les deux courbes c'est que les MF de ND ne montent pas de façon constante jusqu'au pic. De plus, la force diminue comme elle a augmenté avant d'atteindre son pic, lentement pour le ND et rapidement pour le NG.

CHAPITRE V

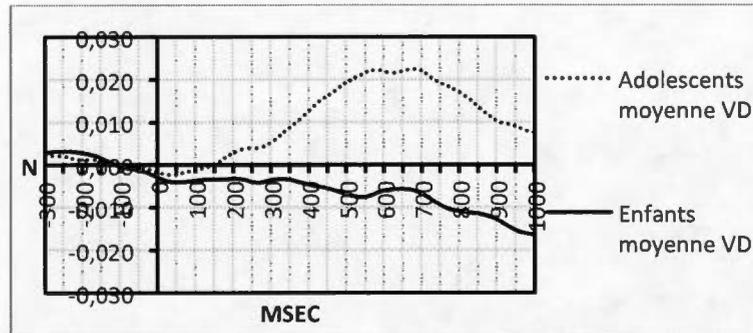
DISCUSSION

La discussion est divisée en thèmes selon les principaux résultats. La première section est sur la différence importante de MF suite aux verbes entre les deux groupes pour la main droite. La deuxième section est sur la similarité entre les groupes des résultats de la main droite suite aux noms. La troisième section est sur la MF de chaque main dans les deux groupes et sur leur relation avec l'activité interhémisphérique. La quatrième section revient sur le cas particulier de la condition VD chez le groupe d'enfants. La cinquième section concerne des analyses complémentaires, mais partielles d'une cueillette de données sur des participants brésiliens qui sont présentées pour agrémenter la discussion. Ces données ne pouvaient être analysées avec celles recueillies au Québec à cause de différences méthodologiques. Plus particulièrement, parce que la tâche était en prise bimanuelle. Finalement, il sera question des limites du projet de recherche et les conclusions générales de celui-ci.

5.1 Le verbe, maturation vers la somatotopie

Le changement des MF de la main droite suite à l'écoute du verbe entre les deux groupes présente les résultats des plus intéressants. Les MF de la condition VD chez l'enfant ne présentent aucune modulation significative comparativement à la ligne de base (Tableau 4.1) ainsi que des MF négatives aux deux dernières fenêtres d'analyse (700 à 800 Msec (Tableau 4.5)).

Figure 5.1 Comparaison intergroupe de VD



Pour le groupe d'adolescents, la courbe de VD demeure la plus longtemps significative (300 à 800 Msec) comparativement à la ligne de base et elle déploie le plus de force (22 mN) en plus d'avoir une augmentation de force significative très tôt (150 Msec après le stimulus (Tableau 4.5)). Le dernier aspect se voit facilement sur la courbe lorsqu'après 150 Msec, l'inclinaison de la courbe devient plus forte (Figure 5.3). Chez l'adolescent, VD est significativement plus fort que VG (Tableau 4.3), ainsi que ND (Tableau 4.4), durant son pic. La comparaison avec NG n'a pas été faite, mais les modulations NG étant très semblables à ND et VG, il est possible que VD aurait été significativement plus fort que NG.

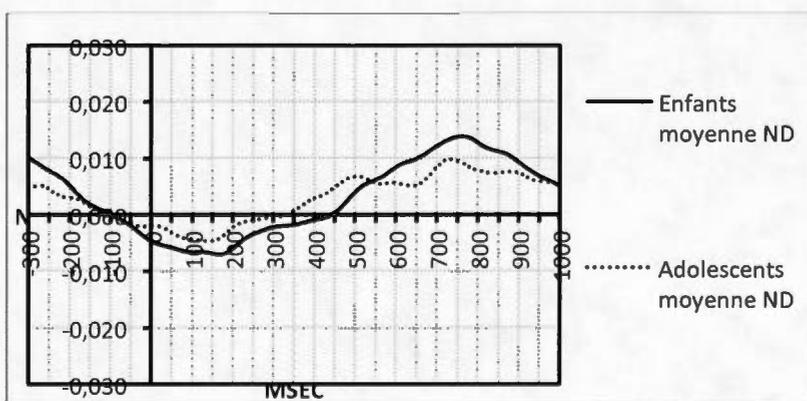
Cette réponse motrice si forte suite au stimulus verbal sur l'adolescent serait due à l'activation somatotopique de M1 et de l'aIPL. Cette activation serait due aux réseaux neuronaux actifs incluant le processus mental qu'est la simulation motrice lors du traitement du mot. Ce réseau serait constitué de l'aire de Wernicke qui décoderait le signal relié à l'aire pariétale pour prendre l'information sémantique en incluant la simulation motrice gérée plus précisément par aIPL. Le signal chemine vers l'aire BA 6 (Victor Frak & Nazir, 2014), l'aire de Broca (BA 44-45) et vers M1 (Picard & Strick, 2001; Ramayya et al., 2010). L'absence de MF chez le groupe d'enfants pourrait s'expliquer par plusieurs facteurs. Premièrement, par la maturation incomplète de la région pariétale qui est liée à la simulation motrice (Toga et al.,

2006). Deuxièmement, un constat pouvant être lié à la première explication. Guilbert et al. (2013) passent en revue plusieurs travaux pour en finir à la conclusion que la simulation motrice commence entre 5 et 7 ans, mais que celle-ci ne sera complète qu'à l'adolescence. Donc, la simulation motrice incomplète liée à l'activation de l'aire intrapariétale de notre groupe d'enfants ne pourrait faire le relai d'information vers M1. Une troisième explication sera élaborée dans la section suivante.

5.2 Le nom, un concept acquis plus jeune.

Si le verbe cause des MF différentes entre les deux groupes, la similarité est le terme représentant les MF dans la main droite suite au stimulus nominal. Il n'y a aucune différence statistique entre les groupes pour ND (Tableau 4.2). Les deux courbes sont significativement positives comparativement à la ligne de base (Tableau 4.1). Elles ont une augmentation importante de la force à la même fenêtre de temps, soit 450 Msec (Tableau 4.5).

Figure 5.2 Comparaison intergroupe de ND



Sur les courbes, on y voit que les deux atteignent leur pic peu après 700 Msec (Figure 5.2). Bien sûr, il y a de petites différences pour le groupe d'adolescents, la courbe ne

monte pas de façon constante jusqu'à son pic après 500 Msec. De plus, la diminution de la force est symétrique à l'augmentation avant son pic. Il y a une déclinaison plus faible pour les adolescents contrairement à la déclinaison plus forte chez les enfants. Tout de même, la similarité des courbes et les statistiques permettent de dire que les MF de la main droite, suite à l'écoute des noms, sont constantes au travers des âges. Ceci est contraire à l'effet des verbes sur la MF, dû aux différences entre les groupes concernant la maturation cérébrale et les processus mentaux de la simulation motrice. Pourquoi n'avons-nous pas la même différence? Pourquoi les MF suite au nom ne se modifient-elles pas suite à la maturation? L'explication la plus plausible est celle de Mestres-Missé, Rodriguez-Fornells et Münte (2009). Les verbes ont un rôle syntaxique différent des noms. Les noms font plus référence à des entités stables et sont plus dans le concret alors que les verbes sont plus régis par l'abstraction, étant donné qu'ils font le pont entre des concepts et des variables. Avec les verbes d'action, ces variables sont le temps et l'espace. Ceci fait en sorte que les noms sont intégrés plus rapidement et plus tôt chez l'enfant. Les noms étant déjà intégrés chez l'enfant refléteraient dès lors une activation motrice lors du traitement linguistique. L'augmentation importante de la force pour ND dans les deux groupes est à 450 Msec. Ceci permettrait d'avancer une liaison avec la fenêtre de traitement sémantique de Friederici (2002), de 300 à 500 Msec.

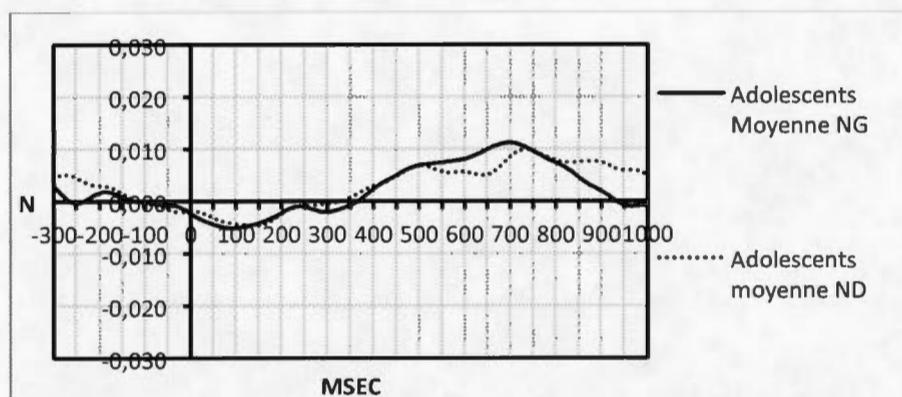
5.3 Activité interhémisphérique

Jusqu'à présent, seules les MF de la main droite ont été expliquées. Ma première hypothèse est qu'il ne devrait pas y avoir de MF dans la main ipsilatérale à l'aire de Broca, la main gauche. Comme le démontrent les statistiques et les graphiques, celle-ci est fautive. Ma deuxième hypothèse présentait un décalage entre la réponse motrice des deux mains pour les deux groupes, mais plus long que 50 Msec pour le groupe d'enfants. Cette hypothèse s'avère aussi fautive.

5.3.1 Les différences interhémisphériques des adolescents

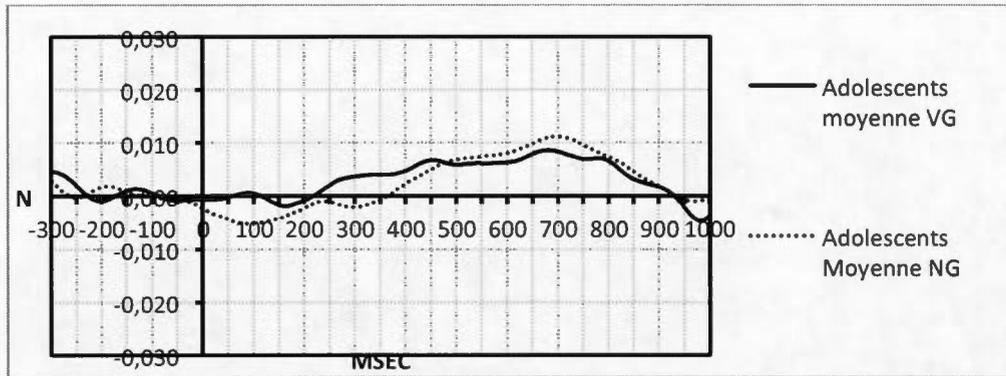
Le groupe d'adolescents présente des MF pour NG et VG. Comparons chacun à son homologue droit, ND et VD.

Figure 5.3 Comparaison intermanuelle du nom chez adolescents



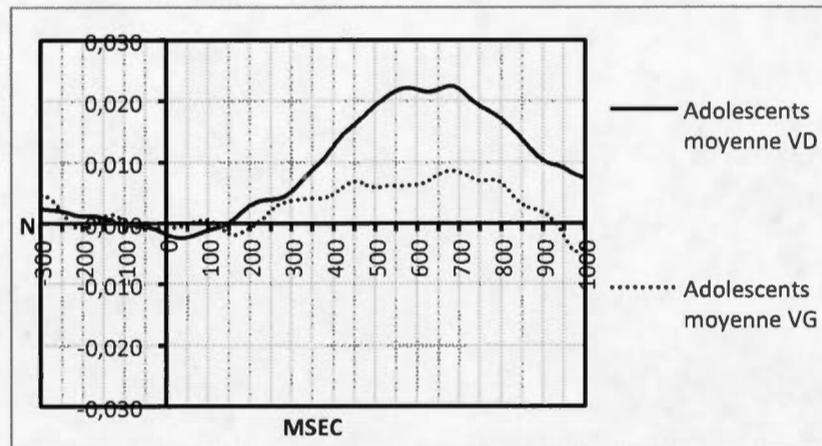
Premièrement, NG et ND ont des courbes similaires, mais comparées à la ligne de base, NG n'a que la première fenêtre significative avec des modulations sous la ligne de base (Tableau 4.1). Cependant, NG et ND n'ont aucune différence significative entre elles (Tableau 4.3). Ceci s'expliquerait par l'étendue des données plus grande de NG que de ND. À la fenêtre de 450 à 500 Msec, à laquelle ND est significative, les deux courbes ont une moyenne égale (6 mN), mais l'écart-type et l'erreur standard de la moyenne sont de 5 mN et 2 mN pour ND et de 14 mN et 5 mN pour NG, soit plus que le double (Tableau B.5 et B.7 de Appendice, section B.1.2). Ensuite, c'est à cette même fenêtre (450 à 500 Msec) que ND enregistre une augmentation importante des MF et NG en présente durant la même période de temps, 350 à 500 Msec (Tableau 4.5). De plus, dans la courbe de ND, l'inclinaison de la force augmente durant la fenêtre de 300 à 350 Msec, tout comme NG (Figure 5.3). Même si celle de NG débute avant, statistiquement et visuellement (dans la même fenêtre de 50 Msec), celle-ci demeure dans la fenêtre d'accès sémantique comme ND (Friederici, 2002). Il y a donc une réponse motrice presque simultanée dans les deux mains à l'écoute du nom.

Figure 5.4 Comparaison des MF de la main gauche des adolescents



Deuxièmement, regardons la réponse motrice de VG. Il y a deux parties à VG. La première est de 0 à 350 Msec où la courbe suit celle de VD et le reste de la courbe, de 350 à 1000 Msec, qui ressemblent à NG. Analysons la ressemblance avec NG en premier. La force est similaire, même si elle est plus faible pour VG. Il n'y a aucune différence dans la comparaison statistique entre les deux (Tableau 4.4). Leurs pics de force sont à moins de 50 Msec de différence. VG est significativement plus fort que la ligne de base de 650 à 750 Msec alors que NG ne l'est pas, malgré que la force soit plus haute. C'est encore ici en raison de l'étendue des données (Tableau B.29 et B.30 de l'Appendice, section B.2.2). Donc, l'écoute du verbe amène une réponse motrice de la main gauche similaire au nom après 350 Msec, mais l'augmentation de la force est très différente. Elle est plus similaire à celle de VD.

Figure 5.5 Comparaison intermanuelle du verbe chez l'adolescent

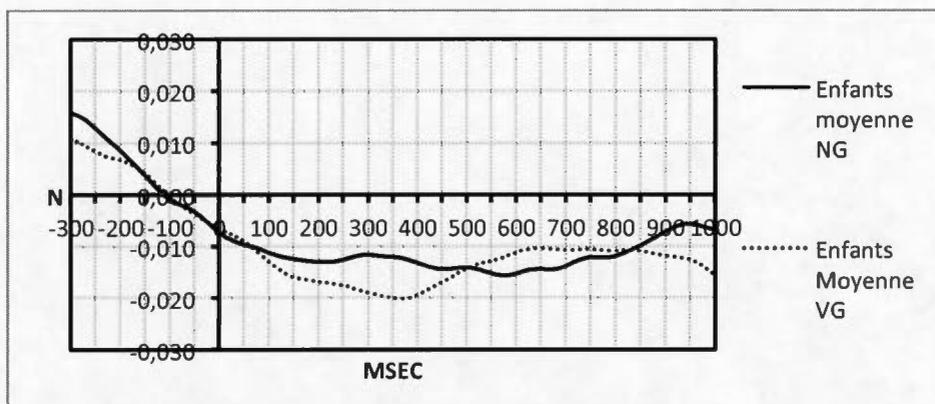


Cette similarité n'est pas démontrée par les statistiques utilisées. À la comparaison de VD et VG, la différence est de 500 à 650 alors que VG est moins fort de 500 à 650. Ensuite, il n'y a pas de modulation importante dans la comparaison temporelle (interfenêtre) comme il en a pour VD. Tout de même, en regardant les courbes à 150 Msec, il y a une augmentation de l'inclinaison de VD et quelques Msec après, VG présente la même inclinaison démontrant une augmentation de la force similaire. Alors que la courbe de VD reprend une inclinaison plus forte après 250 Msec, il y a pratiquement au même moment une atténuation de la courbe de VG qui devient presque plate avant de présenter de petites modulations. Ce changement simultané dans les deux courbes pourrait représenter l'activation et l'inhibition du traitement de l'information. Donc, dû à une latéralisation du langage, seul l'hémisphère gauche continue le traitement linguistique alors que l'hémisphère droit inhiberait son action pour éviter de travailler en double. Cette activation bihémisphérique démontrerait que l'hémisphère gauche est outillé pour traiter le langage, mais la tâche revient à l'hémisphère gauche tant qu'il est fonctionnel. Ceci appuierait les recherches sur la stimulation de l'hémisphère droit, suite à une aphasie de l'hémisphère gauche, pour améliorer les capacités linguistiques (Meltzer et al., 2013).

Finalement, l'adolescent présente des MF dans toutes les conditions. Peu importe le mot, le traitement linguistique activerait l'activité motrice. Ceci s'expliquerait par les résultats de la méta-analyse de Tomasino et Rumiati (2014) dans laquelle ils ont recensé les études démontrant l'activation de M1 et celles qui l'ont réfutée. Malgré l'ambiguïté sur l'activation de M1, ce qui ressort de cette méta-analyse est la présence dans tous les cas d'une activation de l'aire 6 suite aux stimulations linguistiques. Cette aire servirait de passerelle entre la cognition et le système moteur. De plus, l'aire 6 a une forte prépondérance à une activité bihémisphérique, d'où les modifications de la force dans les deux mains. De plus, leur révision de la littérature en vient à la conclusion que cette activation est présente, peu importe le stimulus, que ce soit un verbe d'action ou un nom concret. Ceci explique les MF dans toutes les conditions. Cependant, les MF de VD sont le double des trois autres conditions, ce qui pourrait être une activation somatotopique de M1 présentée dans les théories de Hauk, Johnsrude et Pulvermüller (2004) grâce à la simulation motrice qui active les mêmes régions du cortex cérébral que la réalisation de l'action motrice (Jeannerod & Frak, 1999). Ce qui semble dire que peu importe le mot, un réseau neuronal s'active lors de l'interprétation, mais les aires cérébrales qui s'activent dans ce réseau dépendent de la sémantique de celui-ci. Dans ce cas-ci, selon une sémantique d'action ou de non-action.

5.3.2 Les différences interhémisphériques des enfants.

Figure 5.6 Comparaison des MF de la main gauche des enfants



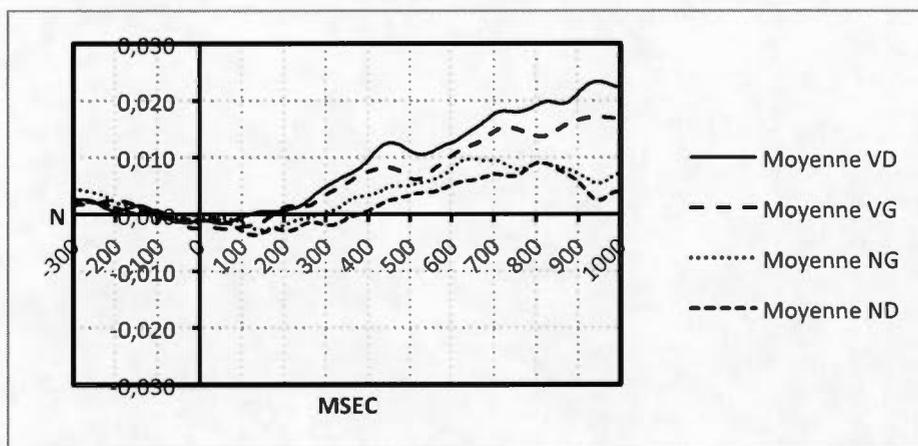
Chez les enfants, les MF sont négatives dans la main gauche (graphique 5.6). Elles sont significativement moins fortes que les mêmes conditions chez l'adolescent (Tableau 4.2). Elles sont significativement plus faibles que la ligne de base (Tableau 5.1). Il n'y a aucune différence significative entre NG et VG (Tableau 4.4). Le NG n'a aucune MF démontrant un changement de force d'une fenêtre à l'autre. Seule VG présente deux modulations, l'une négative à 150 Msec et l'autre positive à 450 Msec (Tableau 4.5). Cet ensemble de résultats et d'absence de résultats laisse croire à des modulations motrices n'ayant pas de lien avec l'activité linguistique. Pour appuyer ceci, en analysant les courbes, nous pouvons voir la force allant en diminuant avant même la moyenne pré-stimulus jusqu'à 400 Msec après le stimulus pour VG. Les MF dans les deux courbes seraient seulement des ajustements de la prise de l'objet qui sont fréquents chez l'enfant (Forssberg et al., 1991). Il y aurait donc une absence de transfert interhémisphérique des liens entre les aires motrices et linguistiques. Celui-ci pourrait s'expliquer par l'immaturité du corps calleux. Chicoine, Proteau et Lassonde (2000), ont démontré que les enfants ayant un corps calleux immature (6-7 ans) et les patients ayant une agénésie n'ont pu faire le transfert de leurs apprentissages d'une tâche unimanuelle visuomotrice. Seuls les enfants de 11-12 ans et les adultes ont réussi le transfert de la tâche. Le groupe d'enfants figure parmi cette

tranche d'âge qui ne peut transférer l'apprentissage de manière interhémisphérique, avec une moyenne 7,4 ans. De plus, la spécialisation hémisphérique du langage est déjà présente chez le nourrisson (Dehaene-Lambertz, 2004). Il est possible de supposer que l'information linguistique et son effet sur la motricité à l'écoute des noms n'est pas transférée dû à cette immaturité du corps calleux alors que nous la retrouvons chez l'adolescent.

5.4 Données brésiliennes

Durant notre maîtrise, mon collègue Rémi Descheneaux-Leroux et moi avons collaboré à une cueillette de données sur une méthodologie similaire à la nôtre dans un hôpital de réadaptation du Brésil. Nous sommes allés au CRER, le Centre hospitalier de Réhabilitation et de Réadaptation de Goiânia (CRER) affilié à la Faculté de médecine de l'Université fédérale de Goiás (Goiânia – GO, Brasil), dans le cadre d'un accord de recherche UQAM-CRER. Nous avons participé à l'installation du matériel d'expérimentation portatif, la mise en place du protocole d'expérimentation et la cueillette de données. Actuellement, nous collaborons au traitement des données et à l'analyse statistique. Au total, les données de 180 enfants, entre 5 et 18 ans, ont été recueillies. À ce jour, seulement les données des adolescents ont été compilées et aucune analyse statistique n'a été faite. Il en reste néanmoins intéressant de regarder les courbes de la figure 5.7. Ce tableau est la moyenne pour chaque condition de 13 participants brésiliens sur lesquelles nous avons utilisé nos critères pour la suppression des données aberrantes. Avant la suppression, l'échantillon était de 15.

Figure 5.7 Graphique des MF de participants brésiliens



Ce groupe brésilien exécutait la même tâche que dans notre méthodologie, sauf que c'était en prise bimanuelle. Deux capteurs étaient utilisés simultanément pour enregistrer les MF des deux mains. Tout comme le groupe d'adolescents canadiens, la main droite déploie plus de force suite à l'écoute du verbe que les trois autres conditions. Cependant, le verbe stimule des MF de la force dans la main gauche d'une façon très similaire à la main droite, mais moins élevée. Les courbes ont une inclinaison similaire et même les petites modulations semblent se suivre (après 500 Msec et 700 Msec). L'effet du nom aussi est similaire entre les participants brésiliens et canadiens. Il y a des MF positives dans les deux cas. Les MF de NG sont légèrement plus fortes que ND, une autre similarité avec nos résultats.

Au final, la simple analyse des graphiques semble confirmer les conclusions sur les liens entre le langage et la motricité ainsi que l'activité bihémisphérique qui en découle. Il faudra tout de même appliquer une analyse statistique pour confirmer ses observations avec certitude. Les MF de VG, pour ce groupe, semblent plus fortes que pour notre groupe d'adolescents. Ceci s'expliquerait par l'influence de la main dominante, la droite dans ce cas-ci, sur la main non dominante lors d'activité motrice bimanuelle (Inui & Hatta, 2002).

5.5 Retour sur VD chez l'enfant

Les MF de la main droite suite à l'écoute du verbe chez l'enfant ne présentent aucune MF significative comparativement à la ligne de base. Ensuite, l'analyse des fenêtres en continu n'est significativement négative qu'aux deux dernières fenêtres, 700 à 800 Msec. Il est vrai que NG pour les enfants et VG pour les adolescents ne présentent pas des MF significatives dans le temps aussi (Tableau 4.5), mais les deux sont suffisamment éloignées de la ligne de base pour être significatives lorsqu'on les compare à cette dernière (Tableau 4.1). Ceci fait de cette condition un cas unique comparé à toutes les conditions dans les deux groupes. Il est possible que l'absence de résultat représente un phénomène qu'il est actuellement difficile d'expliquer. Autres faits qui portent à se questionner, des MF négatives (diminution de la force) arrivent peu après 700 Msec pour toutes les conditions chez l'adolescent (Figure 4.2). Tout comme VD chez l'enfant (Figure 4.1), il serait possible que la fonction du verbe soit différente à cause de l'immaturation cérébrale de l'enfant. Celui-ci aurait un effet de stabilisateur pendant l'exécution d'une action (tenir un objet) au lieu d'être un perturbateur ou facilitateur comme dans les conclusions de Boulenger et al. (2006) et de Fargier et al. (2012). Ce sujet devrait être révisé sous un autre angle. Une méthodologie plus ciblée pourrait faire ressortir si le verbe a une fonction différente chez l'enfant en bas âge.

5.6 Limites du projet

Les critères de sélection ciblent une plus grande partie de la population en sélectionnant les droitiers et ceux sans troubles neurologiques. Nonobstant, l'échantillonnage restreint à cause des limites temporelles de deux ans de maîtrise. Les critères de sélections permettent d'avoir des données représentatives. Contrôler la langue utilisée dans la scolarité et dans les sphères sociales ainsi qu'en sélection selon

la langue maternelle diminue l'influence du phénomène du multilinguisme et de l'activité cérébrale qui n'est pas encore démystifiée de celui-ci. De plus, les résultats en unimanualité ne peuvent se généraliser à la bimanualité. L'activité cérébrale de la bimanualité n'est pas l'addition de deux tâches unimanuelles symétriques (Le, Vesia, Yan, Niemeier, & Crawford, 2014). Cependant, il faut les utiliser plutôt de manière complémentaire pour bien comprendre les liens entre la motricité et le langage. C'est dans ce contexte que la base de données brésiliennes est si intéressante.

Ensuite, ce projet utilise une représentation externe, la force de préhension et ses modulations pour expliquer des processus internes, plus particulièrement neurologiques et cognitifs. Les liens entre les fonctions linguistiques et les fonctions motrices sont faits à l'aide de théories en neuroscience, en psychologie et en linguistique. Pour pallier cette lacune, les capteurs de force seront jumelés à un EEG dans un avenir très proche. De plus, un collègue travaille actuellement avec les capteurs en ajoutant la TMS à la méthodologie. Ces expérimentations apporteront de nouvelles perspectives sur l'activité cérébrale avec l'activité motrice dans un contexte d'activité linguistique ainsi que les processus liés à ceux-ci. Les résultats permettront de mieux reconnaître le potentiel de l'utilisation des capteurs de force dans les domaines de la neuroscience et de la psychologie. De plus, l'ajout d'analyses statistiques peut enrichir notre vision des MF, telles qu'une analyse de prédiction de courbes qui fait partie des objectifs du laboratoire CML et ses partenaires.

5.7 Conclusion

La modulation de la force de préhension par le langage demeure un sujet de recherche innovateur. Au cours de ma maîtrise, j'ai participé au développement d'un système portatif d'évaluation pour faciliter l'étude de ces liens fonctionnels. Les résultats obtenus mettent en évidence que le système portatif est un outil valide. En tenant compte des études antérieures, c'est principalement la similarité des résultats entre les adolescents (comparaison de VD et ND) et des résultats chez les adultes par Frak et al. en 2010, qui confirment sa validité.

Pour la première fois, la MF par le langage a été analysée chez les mêmes participants sur les mains droite et gauche.

En ce qui concerne la main droite, la MF par le verbe est observable chez les adolescents et non chez l'enfant. Ceci est probablement l'expression du degré de maturité de la région pariétale antérieure. L'effet de trouver une modulation pour les noms chez l'enfant exprimerait une modalité fonctionnelle différente par rapport à l'adolescent. En effet, il a été proposé que l'enfant apprend les noms avant les verbes.

En ce qui a trait à la main gauche chez l'enfant, on constate une absence de MF par le langage, alors que chez l'adolescent, on retrouve des modulations dues aux verbes et aux noms. L'ensemble de ces résultats suggère un niveau d'immaturité du corps calleux chez les enfants. Cette immaturité anticipée dans l'hypothèse de départ n'a pas eu les conséquences prévues. Au lieu d'un décalage interhémisphérique, c'est une absence de communication qui est présente chez l'enfant, selon les modulations de la force. Chez l'adolescent, à la place d'un décalage, les résultats laissent croire à une activation simultanée suivie d'une modulation plus forte de la main droite contrôlée par l'hémisphère ayant les fonctions linguistiques (le gauche).

Ces résultats offrent une nouvelle réflexion sur l'usage de la simulation motrice comme outil pédagogique en fonction de l'âge et de l'utilité de la main gauche pour influencer les apprentissages linguistiques.

Je compte continuer à étudier les liens fonctionnels entre le langage et la motricité pour rechercher un marqueur objectif chez les enfants à l'intérieur des différents sous-groupes de la dysphasie développementale, entité dans laquelle l'immaturation du corps calleux a été évoquée.

APPENDICE A

DOCUMENTS ET INFORMATIONS COMPLÉMENTAIRES À LA MÉTHODOLOGIE

A.1 Test de prévalence d'Edinburgh

Faites un « + » dans la colonne appropriée. Si vous pouvez faire l'action des deux mains, mettez un « + » dans chaque colonne. Si vous ne pouvez faire l'action de l'autre main, à moins d'y être forcé, vous mettez « ++ » dans la case de la main préférée.

Tâche	Main gauche préférée	Main droite préférée
Écrire		
Dessiner		
Lancer		
Découper avec des ciseaux		
Se brosser les dents		
Utiliser un couteau (sans fourchette)		
Utiliser une cuillère		
Balayer (main du haut)		
Frotter une allumette (main qui tient l'allumette)		
Ouvrir une boîte (main sur le couvercle)		
Total des signes +		

((colonne de droite – colonne de gauche)/nombre total de signes)*100=

((_____ - _____) / _____) * 100 = _____ %

A.2 Feuille d'identification des participants

Sujet # : _____

Prénom : _____

Date de naissance : _____

Date de test : _____

Âge : _____ Sexe : _____

Pourcentage de prévalence manuelle : _____ % *voir test Edinburgh

Liste 1: _____

Liste 2: _____

Liste 3: _____

Liste 4: _____

Liste 5: _____

Liste 6: _____

Liste 7: _____

Liste 8: _____

Langue parlée à la maison : _____

Langue d'enseignement : _____

Langue de jeu (parlé avec ses pairs) : _____

A.3 Formulaire de consentement Parentale



FORMULAIRE D'INFORMATION ET DE CONSENTEMENT (participant mineur)

«Lien entre le langage et la motricité »

PRÉAMBULE:

Votre enfant est invité à participer à un projet de recherche qui vise à mieux comprendre les liens entre le langage et la motricité. Avant d'accepter de participer à ce projet, il est important de prendre le temps de lire et de bien comprendre les renseignements ci-dessous. S'il y a des mots ou des sections que vous ne comprenez pas, n'hésitez pas à poser des questions.

IDENTIFICATION:

Chercheur(e) responsable du projet : Victor Frak
poste 4407

Tél : (514) 987-3000

Département : Kinanthropologie

Adresse postale : 141, Av. du Président Kennedy, Montréal, Qc, H2X 3X8

Adresse courriel : frak.victor@uqam.ca

Membres de l'équipe : David Labrecque et Rémi Descheneaux-Leroux

Coordonnateurs : David Labrecque et Rémi Descheneaux-Leroux

OBJECTIFS DU PROJET et FINANCEMENT :

L'objectif de la recherche est de comprendre les interactions dans le cerveau entre le langage et la motricité aux travers du développement de l'enfant. Pour ce faire, nous analyserons des éléments externes tels que la force appliquée sur un objet pendant l'écoute de mots à l'aide d'écouteur. Les mots écoutés seront des noms et des verbes fréquemment utilisés dans le vocabulaire de tous les jours. L'expérimentation va être effectuée auprès d'enfants âgés de 5 à 18 ans.

La direction de l'école de votre enfant ainsi que son professeur, [...nom du professeur...], ont également donné leur accord à ce projet.

PROCÉDURES ET TÂCHES DEMANDÉES AU PARTICIPANT:

Avec votre permission et l'accord de l'enfant, il sera invité à écouter huit pistes sonores sur lesquelles il entendra des noms (ex. écluse, étoile...) et des verbes (ex. brosser, arroser...). Les pistes sonores seront écoutées à l'aide d'écouteur englobant l'oreille. Pendant l'écoute de mot, il devra maintenir avec son pouce, son index et son majeur un capteur de force. Quatre listes seront écoutées avec le capteur dans la main

droite et quatre autres avec le capteur dans la main gauche. Chaque piste sonore dure 1 minute et 15 secondes. Entre chaque écoute de piste sonore, votre enfant aura 30 secondes de repos. Durant l'écoute des pistes sonores, votre enfant devra compter le nombre de fois qu'un mot particulier se répète. Il sera avisé avant chaque piste quel mot il doit compter. À la fin de chaque piste, l'enfant devra nous dire combien de fois le mot a été entendu dans la liste sonore. Le tout se passera sur une table ajustée à sa taille (son pupitre par exemple). Au préalable de l'expérimentation, l'enfant devra répondre à un questionnaire qui nous permettra de mettre en pourcentage sa préférence manuelle. L'expérimentation sera faite pendant les heures de cours à la période qui convient au titulaire. Un local de l'école sera mis à la disposition de l'équipe de recherche et un responsable de l'école (enseignant ou personnel administratif) sera présent au moment de l'expérimentation.

AVANTAGES et RISQUES POTENTIELS :

La participation de votre enfant favorisera l'avancement des connaissances dans le domaine de la neurologie. De plus, votre enfant prendra connaissance de ce qu'est la recherche scientifique. Ce sera pour lui, l'occasion de participer à sa première recherche scientifique!

Il n'y a pas de risque d'inconfort significatif, le capteur de force maintenu avec l'index, le majeur et le pouce ne pèse que 55g, soit le poids d'un œuf. Des pauses sont prévues pour éviter la fatigue de votre enfant. De plus, un tapis sera placé sur la table pour le confort de l'avant-bras de votre enfant. Aucun des mots sur les pistes sonores n'est vulgaire ou péjoratif. Soyez assurés que l'équipe de recherche demeurera attentive à toute manifestation d'inconfort chez votre enfant durant sa participation.

Sachez aussi qu'il est de la responsabilité du chercheur responsable de suspendre ou de mettre fin à la participation de votre enfant s'il estime que son bien-être peut être compromis.

ANONYMAT ET CONFIDENTIALITÉ :

Il est entendu que tous les renseignements recueillis auprès de votre enfant lors de l'expérimentation sont confidentiels. Seuls les membres de l'équipe de recherche auront accès aux informations de votre enfant. L'ensemble du matériel de recherche ainsi que le formulaire d'information (test de prévalence manuelle) et de consentement de votre enfant seront conservés séparément en lieu sûr au laboratoire de l'UQAM du chercheur responsable pour la durée totale du projet.

Afin de protéger l'identité et la confidentialité des données recueillies auprès de votre enfant, il, sera toujours identifié(e) par un code alphanumérique. Ce code associé à son nom ne sera connu que du chercheur responsable du projet (et de son délégué).

Le formulaire d'information et de consentement de votre enfant sera conservé pour une période de 5 ans avant d'être détruit.

PARTICIPATION VOLONTAIRE et DROIT DE RETRAIT :

La participation de votre enfant à ce projet est volontaire. Cela signifie que même si vous consentez aujourd'hui à ce que votre enfant participe à ce projet de recherche, il demeure entièrement libre de ne pas participer ou de mettre fin à sa participation en tout temps sans justification ni pénalité. Vous pouvez également retirer votre enfant du projet en tout temps. Dans ce cas, et à moins d'une directive contraire de votre part, les documents concernant votre enfant seront détruits.

Votre accord à participer implique également que vous acceptez que l'équipe de recherche puisse utiliser aux fins de la présente recherche (articles, mémoires et thèses des étudiants membres de l'équipe, conférences et communications scientifiques) les renseignements recueillis à la condition qu'aucune information permettant d'identifier votre enfant ne soit divulguée publiquement à moins d'un consentement explicite de votre part et de l'accord de votre enfant.

COMPENSATION FINANCIÈRE ou AUTRE :

Votre enfant ne sera pas compensé directement. Cependant une collation et un jus lui seront proposés.

CLAUSE DE RESPONSABILITÉ :

En acceptant de participer à ce projet, vous ne renoncez à aucun des droits de votre enfant ni ne libérez les chercheurs, le commanditaire ou les institutions impliquées de leurs obligations légales et professionnelles.

RECHERCHES ULTÉRIEURES :

Au terme du présent projet, nous aimerions conserver sur une période de 5 ans les données recueillies auprès de votre enfant pour conduire d'autres projets de recherche. Les règles d'éthique du présent projet s'appliquent à cette conservation à long terme des données de votre enfant. Vous êtes libre de refuser cette utilisation secondaire.

- J'accepte que ses données puissent être utilisées pour des projets de recherche ultérieurs
- Je refuse que ses données puissent être utilisées pour des projets de recherche ultérieurs

DES QUESTIONS SUR LE PROJET OU SUR VOS DROITS?

Pour des questions additionnelles sur le projet, sur la participation de votre enfant et sur ses droits en tant que participant de recherche, ou bien en cas de retrait, vous pouvez communiquer avec:

Victor Frak Professeur au département de Kinanthropologie de l'UQAM

Numéro de téléphone : (514) 987-3000 poste 4407

Adresse courriel : frak.victor@uqam.ca

Le Comité institutionnel d'éthique de la recherche avec des êtres humains de l'UQAM a approuvé le projet de recherche auquel vous allez participer. Pour des informations concernant les responsabilités de l'équipe de recherche au plan de l'éthique de la recherche avec des êtres humains ou pour formuler une plainte, vous pouvez contacter la présidence du Comité, par l'intermédiaire de son secrétariat au numéro (514) 987-3000 # 7753 ou par courriel à CIEREH@UQAM.CA

REMERCIEMENTS :

La participation de votre enfant est importante à la réalisation de notre projet et l'équipe de recherche tient à vous en remercier. Si vous souhaitez obtenir un résumé écrit des principaux résultats de cette recherche, veuillez ajouter vos coordonnées ci-dessous.

SIGNATURES :

En tant que parent ou tuteur légal de [...prénom et nom de l'enfant...]

- a)** je reconnais avoir lu le présent formulaire d'information et de consentement;
- b)** je consens volontairement à ce que mon enfant participe à ce projet de recherche;
- c)** je comprends les objectifs du projet et ce que la participation de mon enfant implique;
- d)** je confirme avoir disposé de suffisamment de temps pour discuter avec mon enfant de la nature des implications de sa participation;
- e)** je reconnais aussi que le responsable du projet (ou son délégué) a répondu à mes questions de manière satisfaisante; et
- f)** je comprends que la participation de mon enfant à cette recherche est totalement volontaire et que je peux ou qu'il peut y mettre fin en tout temps, sans pénalité d'aucune forme, ni justification à donner.

J'autorise que mon enfant réponde à un questionnaire sur

la prévalence manuelle

NON

OUI

J'autorise que mon enfant participe à l'expérimentation

d'écoute de listes de mots

NON

OUI

Signature de l'enfant (optionnelle) :

Date :

Date

Signature du parent/tuteur légal :

Date :

Nom (lettres moulées) et coordonnées (no de téléphone)

Je, soussigné, déclare :

- a) avoir expliqué le but, la nature, les avantages, les risques du projet et, au besoin, les dispositions du formulaire d'information et de consentement;
et
- b) avoir répondu au meilleur de ma connaissance aux questions posées.

Signature du chercheur responsable du projet ou de son, sa délégué(e) :

Nom (lettres moulées) et coordonnées :

Date :

Un exemplaire du formulaire d'information et de consentement signé doit être remis au parent ou tuteur légal de l'enfant.

A.4 Listes de mots

A.4.1 Les noms

Nom	Temps (Msec)	Nb. de lettres	Nb. de syllabes	Fréquence
aigle	570	5	1	9,00
avion	538	5	2	34,71
banquise	749	8	2	1,00
barrière	854	8	2	12,48
bosquet	635	7	2	1,77
canoë	612	5	3	1,29
canyon	754	6	2	0,58
caverne	775	7	2	4,90
cerise	758	7	2	2,48
chambre	738	7	1	231,23
chateau	635	7	2	3,52
chevalet	738	8	3	3,35
écluse	779	6	2	1,90
étoile	736	6	2	32,42
falaise	824	7	1	3,39
grillage	874	8	2	5,00
grotte	546	6	1	12,35
hêtre	603	5	1	3,10
iceberg	860	7	2	0,77
licorne	793	7	2	1,10
monument	705	8	3	8,61
moquette	754	8	2	7,97
moulin	447	6	2	14,52
mûrier	630	6	2	0,35
oseraie	647	7	3	0,29
penderie	535	8	3	1,39
pommier	459	7	2	5,35
prairie	575	7	2	9,29
rambarde	875	8	2	1,32
requin	563	6	2	1,29
sentier	666	7	2	16,39
tempête	770	7	2	17,42
terrain	561	7	2	61,87

Nom	Temps (Msec)	Nb. de lettres	Nb. de syllabes	Fréquence
toison	588	6	2	3,42
vitrine	790	7	2	11,42
Moyenne	683,89	6,77	2,00	15,06
Écart-type	119,15	0,94	0,54	39,59

A.4.2 Les verbes

Verbe	Temps (Msec)	Nb. de lettres	Nb. de syllabes	Fréquence
agiter	658	6	3	6,68
arroser	667	7	3	2,55
astiquer	763	8	3	1,16
balayer	612	7	3	4,19
brosser	701	7	2	1,65
colorier	641	8	3	0,32
déchirer	787	8	3	5,16
découper	672	8	3	3,81
dessiner	677	8	3	9,74
enfouir	887	7	2	1,90
épiler	658	6	3	0,68
faucher	694	7	2	2,06
frapper	624	7	2	21,19
gratter	663	7	2	4,94
griffer	663	7	2	1,39
jeter	586	5	2	38,77
jongler	687	7	2	0,94
mendier	687	7	2	1,81
montrer	647	7	2	66,61
peigner	554	7	2	0,81
pianoter	677	8	3	0,19
pincer	578	6	2	2,35
prendre	701	7	1	256,16
racler	607	6	2	1,06
râper	670	5	2	0,23
saler	586	5	2	0,39
savonner	777	8	3	0,77

Verbe	Temps (Msec)	Nb. de lettres	Nb. de syllabes	Fréquence
scier	743	5	1	2,39
secouer	752	7	2	8,00
serrer	607	6	2	13,42
signer	755	5	2	9,23
soulever	798	8	3	11,45
tordre	626	6	1	2,90
tricoter	703	8	3	1,77
vernir	861	6	2	0,39
*Moyenne	684,83	6,77	2,29	13,92
*Écart-type	77,22	1,00	0,62	44,05

APPENDICE B

RÉSULTATS STATISTIQUES COMPLETS

B.1 Test-t à échantillon unique (comparaison à la ligne de base).

B.1.1 Résultats du groupe d'enfants

Tableau B.1 Comparaisons des MF de ND avec la ligne de base

Fenêtres de temps	Valeur t	dl	Valeur P	Moyenne	Écart-type	L'erreur standard de la moyenne
100-150	-4,737	10	0,001	-0,007	0,005	0,001
150-200	-3,864	10	0,003	-0,007	0,006	0,002
200-250	-1,628	10	0,135	-0,005	0,009	0,003
250-300	-,765	10	0,462	-0,003	0,012	0,004
300-350	-,484	10	0,639	-0,002	0,014	0,004
350-400	-,339	10	0,742	-0,001	0,013	0,004
400-450	-,112	10	0,913	0,000	0,013	0,004
450-500	,493	10	0,633	0,002	0,014	0,004
500-550	1,163	10	0,272	0,005	0,015	0,005
550-600	1,508	10	0,162	0,007	0,016	0,005
600-650	1,924	10	0,083	0,009	0,016	0,005
650-700	2,421	10	0,036	0,011	0,015	0,005
700-750	2,915	10	0,015	0,013	0,015	0,004
750-800	3,039	10	0,012	,014	,015	,004

Tableau B.2 Comparaisons des MF de VD avec la ligne de base

Fenêtres de temps	Valeur t	dl	Valeur P	Moyenne	Écart-type	L'erreur standard de la moyenne
100-150	-1,313	10	0,219	-0,004	0,009	0,003
150-200	-1,131	10	0,284	-0,003	0,010	0,003
200-250	-,948	10	0,365	-0,004	0,012	0,004
250-300	-,892	10	0,394	-0,004	0,015	0,004
300-350	-,680	10	0,512	-0,003	0,017	0,005
350-400	-,747	10	0,473	-0,004	0,018	0,005
400-450	-,886	10	0,397	-0,005	0,019	0,006
450-500	-1,061	10	0,314	-0,006	0,019	0,006
500-550	-1,253	10	0,239	-0,007	0,020	0,006
550-600	-1,128	10	0,286	-0,007	0,020	0,006
600-650	-,926	10	0,376	-0,006	0,021	0,006
650-700	-,934	10	0,372	-0,006	0,021	0,006
700-750	-1,194	10	0,260	-0,008	0,022	0,007
750-800	-1,445	10	0,179	-0,010	0,024	0,007

Tableau B.3 Comparaisons des MF de NG avec la ligne de base

Fenêtres de temps	Valeur t	dl	Valeur P	Moyenne	Écart-type	L'erreur standard de la moyenne
100-150	-3,889	10	0,003	-0,012	0,010	0,003
150-200	-3,409	10	0,007	-0,013	0,012	0,004
200-250	-3,228	10	0,009	-0,013	0,013	0,004
250-300	-2,770	10	0,020	-0,012	0,014	0,004
300-350	-2,395	10	0,038	-0,012	0,016	0,005
350-400	-2,343	10	0,041	-0,013	0,018	0,005
400-450	-2,556	10	0,029	-0,014	0,018	0,005
450-500	-2,542	10	0,029	-0,014	0,019	0,006
500-550	-2,497	10	0,032	-0,015	0,019	0,006
550-600	-2,478	10	0,033	-0,016	0,021	0,006
600-650	-2,170	10	0,055	-0,015	0,022	0,007
650-700	-1,820	10	0,099	-0,014	0,026	0,008
700-750	-1,466	10	0,173	-0,013	0,029	0,009
750-800	-1,324	10	0,215	-0,012	0,030	0,009

Tableau B.4 Comparaisons des MF de VG avec la ligne de base

Fenêtres de temps	Valeur t	dl	Valeur P	Moyenne	Écart-type	L'erreur standard de la moyenne
100-150	-4,529	10	0,001	-0,015	0,011	0,003
150-200	-4,261	10	0,002	-0,016	0,013	0,004
200-250	-3,741	10	0,004	-0,017	0,015	0,005
250-300	-3,474	10	0,006	-0,018	0,017	0,005
300-350	-3,374	10	0,007	-0,020	0,019	0,006
350-400	-3,296	10	0,008	-0,020	0,020	0,006
400-450	-2,821	10	0,018	-0,018	0,021	0,006
450-500	-2,188	10	0,054	-0,016	0,024	0,007
500-550	-1,714	10	0,117	-0,013	0,026	0,008
550-600	-1,393	10	0,194	-0,012	0,029	0,009
600-650	-1,164	10	0,272	-0,011	0,030	0,009
650-700	-1,136	10	0,282	-0,011	0,031	0,009
700-750	-1,153	10	0,276	-0,011	0,031	0,009
750-800	-1,116	10	0,290	-0,011	0,032	0,010

B.1.2 Résultats du groupe d'adolescents

Tableau B.5 Comparaisons des MF de ND avec la ligne de base

Fenêtres de temps	Valeur t	dl	Valeur P	Moyenne	Écart-type	L'erreur standard de la moyenne
100-150	-1,626	7	0,148	-0,005	0,008	0,003
150-200	-1,160	7	0,284	-0,004	0,009	0,003
200-250	-,644	7	0,540	-0,001	0,006	0,002
250-300	-,332	7	0,750	-0,001	0,006	0,002
300-350	-,010	7	0,992	0,000	0,007	0,002
350-400	,730	7	0,489	0,002	0,007	0,003
400-450	2,198	7	0,064	0,004	0,005	0,002
450-500	3,624	7	0,008	0,006	0,005	0,002
500-550	2,352	7	0,051	0,006	0,008	0,003
550-600	1,558	7	0,163	0,006	0,010	0,004
600-650	1,200	7	0,269	0,005	0,012	0,004
650-700	1,502	7	0,177	0,007	0,012	0,004
700-750	2,368	7	0,050	0,009	0,011	0,004
750-800	2,211	7	0,063	0,009	0,011	0,004

Tableau B.6 Comparaisons des MF de VD avec la ligne de base

Fenêtres de temps	Valeur t	dl	Valeur P	Moyenne	Écart-type	L'erreur standard de la moyenne
100-150	-,373	7	0,720	-0,001	0,004	0,002
150-200	1,016	7	0,344	0,001	0,004	0,001
200-250	2,270	7	0,057	0,004	0,004	0,002
250-300	2,167	7	0,067	0,004	0,006	0,002
300-350	2,905	7	0,023	0,007	0,007	0,002
350-400	4,533	7	0,003	0,011	0,007	0,002
400-450	5,638	7	0,001	0,015	0,007	0,003
450-500	5,918	7	0,001	0,018	0,008	0,003
500-550	7,447	7	0,000	0,021	0,008	0,003
550-600	7,972	7	0,000	0,022	0,008	0,003
600-650	6,555	7	0,000	0,022	0,009	0,003
650-700	5,596	7	0,001	0,022	0,011	0,004
700-750	5,361	7	0,001	0,021	0,011	0,004
750-800	4,351	7	0,003	0,018	0,012	0,004

Tableau B.7 Comparaisons des MF de NG avec la ligne de base

Fenêtres de temps	Valeur t	dl	Valeur P	Moyenne	Écart-type	L'erreur standard de la moyenne
100-150	-2,515	7	0,040	-0,005	0,005	0,002
150-200	-1,740	7	0,125	-0,003	0,005	0,002
200-250	-,456	7	0,663	-0,001	0,008	0,003
250-300	-,438	7	0,675	-0,002	0,011	0,004
300-350	-,332	7	0,750	-0,002	0,013	0,005
350-400	,143	7	0,890	0,001	0,014	0,005
400-450	,785	7	0,458	0,004	0,013	0,005
450-500	1,208	7	0,266	0,006	0,014	0,005
500-550	1,372	7	0,212	0,007	0,015	0,005
550-600	1,464	7	0,186	0,008	0,015	0,005
600-650	1,446	7	0,191	0,009	0,017	0,006
650-700	1,606	7	0,152	0,011	0,019	0,007
700-750	1,537	7	0,168	0,011	0,019	0,007
750-800	1,248	7	0,252	0,008	0,019	0,007

Tableau B.8 Comparaisons des MF de VG avec la ligne de base

Fenêtres de temps	Valeur t	dl	Valeur P	Moyenne	Écart-type	L'erreur standard de la moyenne
100-150	-,181	7	,861	-,001	,008	,003
150-200	-,505	7	,629	-,002	,009	,003
200-250	,156	7	,880	,001	,009	,003
250-300	,823	7	,438	,003	,011	,004
300-350	1,034	7	,335	,004	,011	,004
350-400	1,279	7	,242	,004	,009	,003
400-450	1,728	7	,128	,006	,010	,003
450-500	1,860	7	,105	,006	,010	,003
500-550	1,673	7	,138	,006	,010	,004
550-600	2,067	7	,078	,006	,008	,003
600-650	2,229	7	,061	,007	,009	,003
650-700	3,196	7	,015	,008	,007	,003
700-750	2,600	7	,035	,008	,008	,003
750-800	1,878	7	,102	,007	,011	,004

B.2 ANOVA à mesures répétées

B.2.1 Résultats de l'ANOVA

Tableau B.9 Tests de sphéricité de Maulchy

Effets intrasujets	Khi-deux approx.	dl	Valeur de P	Epsilon Greenhouse- Geisser
mot	N/A	N/A	N/A	N/A
main	N/A	N/A	N/A	N/A
fenêtre	560,926	90	0,001	0,134
mot * main	N/A	N/A	N/A	N/A
mot * fenêtre	391,012	90	0,001	0,157
main * fenêtre	526,797	90	0,001	0,104
mot * main * fenêtre	433,805	90	0,001	0,160

N/A signifie que le test n'est pas effectué lorsqu'il y a deux niveaux à la variable.

Tableau B.10 Résultats de l'ANOVA

Interactions	Valeur F	dl	dl de l'erreur	Valeur P
Mots	0,012	1	17	0,915
Mots*groupes	3,276	1	17	0,088
Mains	10,689	1	17	0,005
Mains*groupes	2,910	1	17	0,106
Fenêtres	8,039	1.745	29,664	0,002
Fenêtres *groupes	2,340	1.745	29,664	0,120
Mots*Mains	0,061	1	17	0,808
Mots*Mains*groupes	2,389	1	17	0,141
Mots*Fenêtres	1,816	2,036	34,604	0,177
Mots* Fenêtres*groupes	2,518	13	34,604	0,094
Mains*Fenêtres	1,119	1,356	23,047	0,322
Mains* Fenêtres*groupes	0,138	1,356	23,047	0,789
Mots*Mains*Fenêtres	1,562	2,082	35,402	0,223
Mots*Mains*Fenêtres *groupes	10,494	2,082	35,402	0,001

B.2.2 Résultats du post-hoc LSD

Tableau B.11 Résultats des comparaisons intergroupe de la condition ND

Fenêtres de temps	Différences entre les moyennes (enfants-adolescents)	L'erreur standard	Valeur P
100-150	-0,002	0,003	0,471
150-200	-0,003	0,003	0,373
200-250	-0,003	0,004	0,423
250-300	-0,002	0,005	0,662
300-350	-0,002	0,005	0,713
350-400	-0,003	0,005	0,539
400-450	-0,004	0,005	0,414
450-500	-0,004	0,005	0,466
500-550	-0,001	0,006	0,857
550-600	0,002	0,006	0,801
600-650	0,004	0,007	0,562
650-700	0,004	0,007	0,512
700-750	0,004	0,006	0,574
750-800	0,005	0,006	0,441

Tableau B.12 Résultats des comparaisons intergroupe de la condition NG

Fenêtres de temps	Différences entre les moyennes (enfants-adolescents)	L'erreur standard	Valeur P
100-150	-0,007	0,004	0,085
150-200	-0,009	0,005	0,060
200-250	-0,012	0,005	0,044
250-300	-0,010	0,006	0,107
300-350	-0,010	0,007	0,158
350-400	-0,013	0,008	0,099
400-450	-0,018	0,008	0,033
450-500	-0,020	0,008	0,019
500-550	-0,022	0,008	0,017
550-600	-0,023	0,009	0,015
600-650	-0,024	0,010	0,024
650-700	-0,025	0,011	0,034
700-750	-0,023	0,012	0,065
750-800	-0,021	0,012	0,111

Tableau B.13 Résultats des comparaisons intergroupe de la condition VD

Fenêtres de temps	Différences entre les moyennes (enfants-adolescents)	L'erreur standard	Valeur P
100-150	-0,003	0,003	0,405
150-200	-0,005	0,004	0,210
200-250	-0,007	0,005	0,140
250-300	-0,008	0,006	0,152
300-350	-0,010	0,006	0,116
350-400	-0,015	0,007	0,043
400-450	-0,020	0,007	0,013
450-500	-0,024	0,007	0,005
500-550	-0,028	0,007	0,001
550-600	-0,029	0,008	0,001
600-650	-0,027	0,008	0,003
650-700	-0,028	0,008	0,003
700-750	-0,029	0,009	0,004
750-800	-0,029	0,009	0,006

Tableau B.14 Résultats des comparaisons intergroupe de la condition VG

Fenêtres de temps	Différences entre les moyennes (enfants-adolescents)	L'erreur standard	Valeur P
100-150	-0,014	0,005	0,007
150-200	-0,015	0,005	0,011
200-250	-0,018	0,006	0,010
250-300	-0,021	0,007	0,007
300-350	-0,023	0,008	0,006
350-400	-0,024	0,008	0,006
400-450	-0,024	0,008	0,009
450-500	-0,022	0,009	0,025
500-550	-0,019	0,010	0,062
550-600	-0,018	0,011	0,101
600-650	-0,018	0,011	0,131
650-700	-0,019	0,011	0,108
700-750	-0,018	0,011	0,121
750-800	-0,018	0,012	0,152

Tableau B.15 Résultats des comparaisons entre les mots sur la main droite des enfants

Fenêtres de temps	Différences entre les moyennes (nom-verbe)	L'erreur standard	Valeur P
100-150	-0,003	0,003	0,258
150-200	-0,003	0,003	0,256
200-250	-0,001	0,003	0,745
250-300	0,001	0,003	0,726
300-350	0,001	0,004	0,697
350-400	0,003	0,004	0,506
400-450	0,005	0,004	0,291
450-500	0,008	0,004	0,066
500-550	0,013	0,004	0,007
550-600	0,014	0,004	0,005
600-650	0,015	0,005	0,006
650-700	0,017	0,005	0,005
700-750	0,021	0,006	0,002
750-800	0,024	0,006	0,001

Tableau B.16 Résultats des comparaisons entre les mots sur la main droite des adolescents

Fenêtres de temps	Différences entre les moyennes (nom-verbe)	L'erreur standard	Valeur P
100-150	-0,004	0,003	0,225
150-200	-0,005	0,003	0,148
200-250	-0,005	0,004	0,209
250-300	-0,005	0,004	0,218
300-350	-0,007	0,004	0,109
350-400	-0,009	0,005	0,079
400-450	-0,011	0,005	0,043
450-500	-0,012	0,005	0,030
500-550	-0,014	0,005	0,010
550-600	-0,016	0,005	0,005
600-650	-0,016	0,006	0,010
650-700	-0,016	0,006	0,021
700-750	-0,011	0,007	0,114
750-800	-0,010	0,007	0,204

Tableau B.17 Résultats des comparaisons entre les mots sur la main gauche des enfants

Fenêtres de temps	Différences entre les moyennes (nom-verbe)	L'erreur standard	Valeur P
100-150	0,003	0,004	0,485
150-200	0,004	0,004	0,384
200-250	0,004	0,004	0,328
250-300	0,006	0,004	0,184
300-350	0,008	0,005	0,168
350-400	0,007	0,006	0,221
400-450	0,004	0,006	0,479
450-500	0,001	0,006	0,835
500-550	-0,001	0,007	0,872
550-600	-0,003	0,007	0,638
600-650	-0,004	0,008	0,603
650-700	-0,004	0,008	0,646
700-750	-0,002	0,009	0,804
750-800	-0,001	0,009	0,875

Tableau B.18 Résultats des comparaisons entre les mots sur la main gauche des adolescents

Fenêtres de temps	Différences entre les moyennes (nom-verbe)	L'erreur standard	Valeur P
100-150	-0,004	0,004	0,363
150-200	-0,002	0,005	0,729
200-250	-0,002	0,005	0,715
250-300	-0,005	0,005	0,375
300-350	-0,005	0,006	0,394
350-400	-0,004	0,007	0,616
400-450	-0,002	0,007	0,756
450-500	0,000	0,008	0,974
500-550	0,001	0,008	0,893
550-600	0,002	0,009	0,857
600-650	0,002	0,009	0,832
650-700	0,002	0,009	0,808
700-750	0,003	0,010	0,773
750-800	0,001	0,010	0,891

Tableau B.19 Résultats des comparaisons entre les mains suite aux noms chez les enfants

Fenêtres de temps	Différences entre les moyennes (Droite-gauche)	L'erreur standard	Valeur P
100-150	0,005	0,003	0,102
150-200	0,006	0,003	0,102
200-250	0,008	0,004	0,033
250-300	0,009	0,004	0,037
300-350	0,010	0,005	0,056
350-400	0,011	0,005	0,040
400-450	0,013	0,005	0,019
450-500	0,016	0,006	0,009
500-550	0,020	0,006	0,004
550-600	0,023	0,007	0,003
600-650	0,024	0,007	0,004
650-700	0,025	0,008	0,007
700-750	0,026	0,009	0,011
750-800	0,026	0,009	0,013

Tableau B.20 Résultats des comparaisons entre les mains suite aux noms chez les adolescents

Fenêtres de temps	Différences entre les moyennes (Droite-gauche)	L'erreur standard	Valeur P
100-150	0,000	0,004	0,965
150-200	0,000	0,004	0,921
200-250	0,000	0,004	0,979
250-300	0,001	0,005	0,841
300-350	0,001	0,006	0,795
350-400	0,001	0,006	0,841
400-450	0,000	0,006	1,000
450-500	0,000	0,006	0,992
500-550	-0,001	0,007	0,909
550-600	-0,002	0,008	0,778
600-650	-0,004	0,009	0,670
650-700	-0,004	0,010	0,674
700-750	-0,001	0,011	0,919
750-800	0,000	0,011	0,982

Tableau B.21 Résultats des comparaisons entre les mains suite aux verbes chez les enfants

Fenêtres de temps	Différences entre les moyennes (Droite-gauche)	L'erreur standard	Valeur P
100-150	0,011	0,003	0,001
150-200	0,013	0,003	0,000
200-250	0,014	0,003	0,000
250-300	0,014	0,004	0,001
300-350	0,016	0,004	0,002
350-400	0,016	0,005	0,003
400-450	0,013	0,005	0,014
450-500	0,009	0,005	0,076
500-550	0,006	0,005	0,268
550-600	0,005	0,005	0,353
600-650	0,005	0,006	0,409
650-700	0,005	0,006	0,456
700-750	0,003	0,006	0,681
750-800	0,000	0,007	0,953

Tableau B.22 Résultats des comparaisons entre les mains suite aux noms chez les adolescents

Fenêtres de temps	Différences entre les moyennes (Droite-gauche)	L'erreur standard	Valeur P
100-150	0,000	0,003	0,988
150-200	0,003	0,003	0,389
200-250	0,003	0,004	0,423
250-300	0,001	0,004	0,781
300-350	0,003	0,005	0,558
350-400	0,006	0,005	0,258
400-450	0,009	0,006	0,145
450-500	0,011	0,006	0,070
500-550	0,015	0,006	0,031
550-600	0,016	0,006	0,025
600-650	0,015	0,007	0,043
650-700	0,014	0,007	0,065
700-750	0,013	0,007	0,089
750-800	0,011	0,008	0,184

Tableau B.23 Résultats des comparaisons entre les fenêtres successives pour la condition ND chez les enfants

Fenêtres de temps 1	Fenêtres de temps 2	Différences entre les moyennes des fenêtres (2-1)	L'erreur standard	Valeur P
100-150	150-200	0,000	0,001	0,899
150-200	200-250	0,002	0,001	0,086
200-250	250-300	0,002	0,001	0,123
250-300	300-350	0,001	0,001	0,467
300-350	350-400	0,001	0,001	0,528
350-400	400-450	0,001	0,001	0,346
400-450	450-500	0,003	0,001	0,000
450-500	500-550	0,003	0,001	0,004
500-550	550-600	0,002	0,001	0,027
550-600	600-650	0,002	0,001	0,020
600-650	650-700	0,002	0,001	0,037
650-700	700-750	0,002	0,001	0,121
700-750	750-800	0,000	0,001	0,668

Tableau B.24 Résultats des comparaisons entre les fenêtres successives pour la condition NG chez les enfants

Fenêtres de temps 1	Fenêtres de temps 2	Différences entre les moyennes des fenêtres (2-1)	L'erreur standard	Valeur P
100-150	150-200	-0,001	0,001	0,433
150-200	200-250	0,000	0,001	0,860
200-250	250-300	0,001	0,001	0,401
250-300	300-350	0,000	0,001	0,901
300-350	350-400	-0,001	0,001	0,488
350-400	400-450	-0,001	0,001	0,158
400-450	450-500	0,000	0,001	0,696
450-500	500-550	0,000	0,001	0,676
500-550	550-600	-0,001	0,001	0,345
550-600	600-650	0,001	0,001	0,466
600-650	650-700	0,000	0,001	0,788
650-700	700-750	0,001	0,001	0,146
700-750	750-800	0,001	0,001	0,596

Tableau B.25 Résultats des comparaisons entre les fenêtres successives pour la condition VD chez les enfants

Fenêtres de temps 1	Fenêtres de temps 2	Différences entre les moyennes des fenêtres (2-1)	L'erreur standard	Valeur P
100-150	150-200	0,000	0,001	0,732
150-200	200-250	0,000	0,001	0,881
200-250	250-300	0,000	0,001	0,627
250-300	300-350	0,001	0,001	0,617
300-350	350-400	-0,001	0,001	0,436
350-400	400-450	-0,001	0,001	0,289
400-450	450-500	-0,001	0,001	0,270
450-500	500-550	-0,001	0,001	0,101
500-550	550-600	0,001	0,001	0,434
550-600	600-650	0,001	0,001	0,194
600-650	650-700	0,000	0,001	0,798
650-700	700-750	-0,002	0,001	0,035
700-750	750-800	-0,002	0,001	0,039

Tableau B.26 Résultats des comparaisons entre les fenêtres successives pour la condition VG chez les enfants

Fenêtres de temps 1	Fenêtres de temps 2	Différences entre les moyennes des fenêtres (2-1)	L'erreur standard	Valeur P
100-150	150-200	-0,002	0,001	0,041
150-200	200-250	-0,001	0,001	0,504
200-250	250-300	-0,001	0,001	0,400
250-300	300-350	-0,001	0,001	0,202
300-350	350-400	0,000	0,001	0,754
350-400	400-450	0,002	0,001	0,062
400-450	450-500	0,003	0,001	0,050
450-500	500-550	0,002	0,001	0,094
500-550	550-600	0,001	0,001	0,234
550-600	600-650	0,001	0,001	0,145
600-650	650-700	0,000	0,001	0,967
650-700	700-750	0,000	0,001	0,941
700-750	750-800	0,000	0,001	0,913

Tableau B.27 Résultats des comparaisons entre les fenêtres successives pour la condition ND chez les adolescents

Fenêtres de temps 1	Fenêtres de temps 2	Différences entre les moyennes des fenêtres (2-1)	L'erreur standard	Valeur P
100-150	150-200	0,001	0,001	0,371
150-200	200-250	0,002	0,001	0,132
200-250	250-300	0,001	0,001	0,582
250-300	300-350	0,001	0,001	0,580
300-350	350-400	0,002	0,001	0,124
350-400	400-450	0,002	0,001	0,113
400-450	450-500	0,002	0,001	0,003
450-500	500-550	0,000	0,001	0,780
500-550	550-600	-0,001	0,001	0,416
550-600	600-650	0,000	0,001	0,727
600-650	650-700	0,001	0,001	0,145
650-700	700-750	0,003	0,002	0,076
700-750	750-800	-0,001	0,001	0,490

Tableau B.28 Résultats des comparaisons entre les fenêtres successives pour la condition NG chez les adolescents

Fenêtres de temps 1	Fenêtres de temps 2	Différences entre les moyennes des fenêtres (2-1)	L'erreur standard	Valeur P
100-150	150-200	0,001	0,001	0,241
150-200	200-250	0,002	0,001	0,092
200-250	250-300	0,000	0,001	0,771
250-300	300-350	0,000	0,001	0,883
300-350	350-400	0,002	0,001	0,044
350-400	400-450	0,003	0,001	0,015
400-450	450-500	0,002	0,001	0,025
450-500	500-550	0,001	0,001	0,272
500-550	550-600	0,001	0,001	0,603
550-600	600-650	0,001	0,001	0,362
600-650	650-700	0,002	0,002	0,293
650-700	700-750	0,000	0,001	0,870
700-750	750-800	-0,002	0,002	0,166

Tableau B.29 Résultats des comparaisons entre les fenêtres successives pour la condition VD chez les adolescents

Fenêtres de temps 1	Fenêtres de temps 2	Différences entre les moyennes des fenêtres (2-1)	L'erreur standard	Valeur P
100-150	150-200	0,002	0,001	0,003
150-200	200-250	0,002	0,001	0,081
200-250	250-300	0,001	0,001	0,512
250-300	300-350	0,003	0,001	0,053
300-350	350-400	0,004	0,001	0,001
350-400	400-450	0,004	0,001	0,002
400-450	450-500	0,003	0,001	0,013
450-500	500-550	0,003	0,001	0,003
500-550	550-600	0,001	0,001	0,116
550-600	600-650	0,000	0,001	0,698
600-650	650-700	0,001	0,001	0,590
650-700	700-750	-0,002	0,001	0,120
700-750	750-800	-0,002	0,001	0,063

Tableau B.30 Résultats des comparaisons entre les fenêtres successives pour la condition VG chez les adolescents

Fenêtres de temps 1	Fenêtres de temps 2	Différences entre les moyennes des fenêtres (2-1)	L'erreur standard	Valeur P
100-150	150-200	-0,001	0,001	0,314
150-200	200-250	0,002	0,001	0,101
200-250	250-300	0,003	0,001	0,092
250-300	300-350	0,001	0,001	0,484
300-350	350-400	0,000	0,002	0,853
350-400	400-450	0,002	0,001	0,123
400-450	450-500	0,000	0,001	0,758
450-500	500-550	0,000	0,001	0,830
500-550	550-600	0,000	0,001	0,902
550-600	600-650	0,001	0,001	0,482
600-650	650-700	0,001	0,001	0,314
650-700	700-750	-0,001	0,001	0,519
700-750	750-800	-0,001	0,001	0,543

RÉFÉRENCES

- Aravena, P., Courson, M., Frak, V., Cheylus, A., Paulignan, Y., Deprez, V., & Nazir, T. a. (2014). Action relevance in linguistic context drives word-induced motor activity. *Frontiers in Human Neuroscience*, 8(April), 163. doi:10.3389/fnhum.2014.00163
- Aravena, P., Delevoeye-Turrell, Y., Deprez, V., Cheylus, A., Paulignan, Y., Frak, V., & Nazir, T. (2012). Grip force reveals the context sensitivity of language-induced motor activity during “action words” processing: evidence from sentential negation. *PloS One*, 7(12), e50287. doi:10.1371/journal.pone.0050287
- Boulenger, V., Roy, A. C., Paulignan, Y., Deprez, V., Jeannerod, M., & Nazir, T. A. (2006). Cross-talk between Language Processes and Overt Motor Behavior in the First 200 msec of Processing. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 18(10), 1607–1615.
- Bourbonnais, D., Frak, V., Pilon, J.-F., & Goyette, M. (2008). An instrumented cylinder measuring pinch force and orientation. *Journal of Neuroengineering and Rehabilitation*, 5, 2. doi:10.1186/1743-0003-5-2
- Cattaneo, Z., Pisoni, A., & Papagno, C. (2011). Transcranial direct current stimulation over Broca’s region improves phonemic and semantic fluency in healthy individuals. *Neuroscience*, 183, 64–70. doi:10.1016/j.neuroscience.2011.03.058
- Chicoine, A.-J., Proteau, L., & Lassonde, M. (2000). Absence of Interhemispheric Transfer of Unilateral Visuomotor Learning in Young Children and Individuals With Agenesis of the Corpus Callosum. *Developmental Neuropsychology*, 18(1), 73–94. doi:10.1207/S15326942DN1801
- Dehaene-Lambertz, G. (2004). Bases cérébrales de l’acquisition du langage : apport de la neuro-imagerie. *Neuropsychiatrie de l’Enfance et de l’Adolescence*, 52(7), 452–459. doi:10.1016/j.neurenf.2004.09.003
- Desai, R. H., Binder, J. R., Conant, L. L., Mano, Q. R., & Seidenberg, M. S. (2011). The neural career of sensory-motor metaphors. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 23(9), 2376–2386. doi:10.1162/jocn.2010.21596
- Fargier, R., Ménorte, M., Boulenger, V., Nazir, T. A., & Paulignan, Y. (2012). Grasp It Loudly! Supporting Actions with Semantically Congruent Spoken Action

Words. *PloS One*, 7(1), 1–11. doi:10.1371/journal.pone.0030663

- Forsberg, H., Eliasson, a C., Kinoshita, H., Johansson, R. S., & Westling, G. (1991). Development of human precision grip. I: Basic coordination of force. *Experimental Brain Research*, 85(2), 451–457.
- Forsberg, H., Kinoshita, H., Eliasson, A., Johansson, R., Westling, G., & Gordon, A. (1992). Development of human precision grip. II: Anticipatory control of isometric forces targeted for object's weight. *Experimental Brain ...*, 90, 393–398.
- Frak, V., Bourbonnais, D., Croteau, I., & Cohen, H. (2006). Interlimb transfer of grasp orientation is asymmetrical. *TheScientificWorldJournal*, 6, 1805–1809. doi:10.1100/tsw.2006.291
- Frak, V., & Nazir, T. (2014). *Le Langage au Bout des Doigts; les liens fonctionnels entre la motricité et le langage*. (P. de l'Université du Québec., Ed.). Québec.
- Frak, V., Nazir, T., Goyette, M., Cohen, H., & Jeannerod, M. (2010). Grip force is part of the semantic representation of manual action verbs. *PloS One*, 5(3), e9728. doi:10.1371/journal.pone.0009728
- Friederici, A. D. (2002). Towards a neural basis of auditory sentence processing. *Trends in Cognitive Sciences*, 6(2), 78–84.
- Gilliam, M., Stockman, M., Malek, M., Sharp, W., Greenstein, D., Lalonde, F., ... Shaw, P. (2011). Developmental trajectories of the corpus callosum in attention-deficit/hyperactivity disorder. *Biological Psychiatry*, 69(9), 839–46. doi:10.1016/j.biopsych.2010.11.024
- Glenberg, a M. (1997). What memory is for. *The Behavioral and Brain Sciences*, 20(1), 1–19; discussion 19–55.
- Gordon, a M., Forsberg, H., Johansson, R. S., Eliasson, a C., & Westling, G. (1992). Development of human precision grip. III: Integration of visual size cues during the programming of isometric forces. *Experimental Brain Research*, 90(2), 399–403.
- Guilbert, J., Jouen, F., Lehalle, H., & Molina, M. (2013). Imagerie motrice interne et simulation de l'action chez l'enfant. *L'Année Psychologique*, 113(03), 459–488. doi:10.4074/S0003503313003060
- Hartwigsen, G., & Siebner, H. R. (2012). Probing the involvement of the right hemisphere in language processing with online transcranial magnetic stimulation in healthy volunteers. *Aphasiology*, 26(9), 1131–1152. doi:10.1080/02687038.2011.590573
- Hauk, O., Johnsrude, I., & Pulvermüller, F. (2004). Somatotopic representation of action words in human motor and premotor cortex. *Neuron*, 41(2), 301–7.

- Hauk, O., & Tschentscher, N. (2013). The Body of Evidence: What Can Neuroscience Tell Us about Embodied Semantics? *Frontiers in Psychology*, 4(February), 50. doi:10.3389/fpsyg.2013.00050
- Hommel, B., Müsseler, J., Aschersleben, G., & Prinz, W. (2001). The Theory of Event Coding (TEC): a framework for perception and action planning. *The Behavioral and Brain Sciences*, 24(5), 849–78; discussion 878–937.
- Inui, N., & Hatta, H. (2002). Asymmetric control of force and symmetric control of timing in bimanual finger tapping. *Human Movement Science*, 21(2), 131–146. doi:10.1016/S0167-9457(02)00094-5
- Jeannerod, M. (1994). The representing brain: Neural correlates of motor intention and imagery. *Behavioral and Brain Sciences*, 17, 187–245. doi:10.1017/S0140525X00034026
- Jeannerod, M., & Frak, V. (1999). Mental imaging of motor activity in humans. *Current Opinion in Neurobiology*, 9(6), 735–9.
- Kindler, J., Schumacher, R., Cazzoli, D., Gutbrod, K., Koenig, M., Nyffeler, T., ... Müri, R. M. (2012). Theta burst stimulation over the right Broca's homologue induces improvement of naming in aphasic patients. *Stroke; a Journal of Cerebral Circulation*, 43(8), 2175–9. doi:10.1161/STROKEAHA.111.647503
- Le, A., Vesia, M., Yan, X., Niemeier, M., & Crawford, J. D. (2014). The right anterior intraparietal sulcus is critical for bimanual grasping: a TMS study. *Cerebral Cortex (New York, N.Y. : 1991)*, 24(10), 2591–2603. doi:10.1093/cercor/bht115
- Meltzer, J. a, Wagage, S., Ryder, J., Solomon, B., & Braun, A. R. (2013). Adaptive significance of right hemisphere activation in aphasic language comprehension. *Neuropsychologia*, 51(7), 1248–59. doi:10.1016/j.neuropsychologia.2013.03.007
- Mestres-Missé, A., Rodriguez-Fornells, A., & Münte, T. F. (2009). Neural differences in the mapping of verb and noun concepts onto novel words. *NeuroImage*. doi:10.1016/j.neuroimage.2009.10.018
- Nazir, T., Hrycyk, L., Moreau, Q., Frak, V., Cheylus, A., Ott, L., ... Yvonne, D. (2016). A simple technique to study Embodied language processes: The grip-Force sensor. *Behavior Research Methods*.
- New, B., Pallier, C., Ferrand, L., & Matos, R. (2001). Une base de données lexicales du français contemporain sur internet: LEXIQUE. *L'année Psychologique*, 101, 447–462. doi:10.3406/psy.2001.1341
- Oldfield, R. C. (1971). The assessment and analysis of handedness: the Edinburgh inventory. *Neuropsychologia*, 9, 97–113. doi:10.1016/0028-3932(71)90067-4

- Picard, N., & Strick, P. L. (2001). Imaging the premotor areas. *Current Opinion in Neurobiology*, *11*(6), 663–672. doi:10.1016/S0959-4388(01)00266-5
- Purves, D., Augustine, G. J., Fitzpatrick, D., Hall, W. C., LaMantia, An.-S., & McNamara, J. O. (2007). *Neurosciences*. (D. Boeck, Ed.) (3e ed.). Bruxelles.
- Ramayya, A. G., Glasser, M. F., & Rilling, J. K. (2010). A DTI investigation of neural substrates supporting tool use. *Cerebral Cortex (New York, N.Y. : 1991)*, *20*(3), 507–16. doi:10.1093/cercor/bhp141
- Restle, J., Murakami, T., & Ziemann, U. (2012). Facilitation of speech repetition accuracy by theta burst stimulation of the left posterior inferior frontal gyrus. *Neuropsychologia*, *50*(8), 2026–31. doi:10.1016/j.neuropsychologia.2012.05.001
- Rice, N. J., Tunik, E., Cross, E. S., & Grafton, S. T. (2007). On-line grasp control is mediated by the contralateral hemisphere. *Brain Research*, *1175*, 76–84. doi:10.1016/j.brainres.2007.08.009
- Ringo, J. L., Doty, R. W., Demeter, S., & Simard, P. Y. (1994). Time Is of the Essence: that Hemispheric Conjecture from Arises Specialization Delay Interhemispheric Conduction. *Cerebral Cortex*, *4*, 331–343.
- Toga, A. W., Thompson, P. M., & Sowell, E. R. (2006). Mapping brain maturation. *Trends in Neurosciences*, *29*(3), 148–59. doi:10.1016/j.tins.2006.01.007
- Tunik, E., Rice, N., Hamilton, A., & Grafton, S. (2007). Beyond grasping: representation of action in human anterior intraparietal sulcus. *NeuroImage*, *36*, 77–86. doi:10.1016/j.neuroimage.2007.03.026
- Tyler, L. K., Wright, P., Randall, B., Marslen-Wilson, W. D., & Stamatakis, E. a. (2010). Reorganization of syntactic processing following left-hemisphere brain damage: does right-hemisphere activity preserve function? *Brain : A Journal of Neurology*, *133*(11), 3396–408. doi:10.1093/brain/awq262