

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL

ÉTUDE DE LA MODULATION DE L'ACTIVITÉ MOTRICE PAR LE LANGAGE
CHEZ LES ADOLESCENTS ATTEINTS DU TROUBLE DÉVELOPPEMENTAL
DU LANGAGE.

THÈSE

PRÉSENTÉE

COMME EXIGENCE PARTIELLE

DU DOCTORAT EN BIOLOGIE

PAR

DAVID LABRECQUE

DÉCEMBRE 2023

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL
Service des bibliothèques

Avertissement

La diffusion de cette thèse 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.04-2020). 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 mon directeur Victor Frak pour les 11 années de mentorat, de collaboration et de supervision. Il m'a intégré dans son laboratoire Cerveau, Motricité et Langage (CML) pendant la fin de mon baccalauréat, alors que j'étais son auxiliaire d'enseignement, dans le but que je fasse ma maîtrise avec lui. Ce document est la preuve qu'il a réussi, car j'ai réalisé ma maîtrise et mon doctorat sous sa supervision. Je souhaite également remercier mon co-directeur Stevan Étienne Harnad. Parmi ce qu'il m'a apporté en m'intégrant dans son laboratoire, la capacité à vulgariser des concepts complexes m'a probablement le plus marqué. J'espère que cela paraît dans ce document. Je tiens aussi à remercier mes collègues et ami(e)s, Ronaldo da Silva et Fernanda Pérez-Gay Juárez. Merci pour votre soutien. Ce fut un plaisir de travailler avec vous et ce serait un plaisir de collaborer avec vous dans d'autres projets. De plus, je remercie les stagiaires avec qui j'ai travaillé au cours de mon doctorat : Carla Frak, Stéphanie Care, Adèle Saives, Jessica Clément et Philippe Angers. J'exprime en outre ma reconnaissance à Rémi Descheneaux-Leroux. Nous avons découvert les liens entre la motricité et le langage ensemble ! Il ne faut pas oublier les professionnels du CRER au Brésil. Merci d'avoir partagé ces expériences, votre expertise et de bons repas brésiliens ! Je veux également remercier les organismes et les personnes-ressources qui m'ont aidé dans la recherche de participants et la collecte de données : l'Institut Raymond-Dewar (CRIR), Dysphasie Laurentides, Dysphasie plus et le Centre de services scolaire de Laval. Je remercie aussi les étudiants et collaborateurs du laboratoire Cognition et communication de l'UQAM. Je remercie les techniciens du département des Sciences de l'Activité Physique qui ont construit, programmé, réparé notre matériel. Je tiens aussi à remercier Jill Vandermeerschen, analyste au service de consultation en analyses de données de l'UQAM, pour m'avoir officieusement, au

travers de nos échanges et rencontres, formé en statistique et d'avoir toujours gardé ta porte ouverte pour m'aider et me conseiller. Finalement, je remercie ma famille pour leur soutien, particulièrement ma conjointe Stéphanie, pour son soutien et son aide, et mes enfants, Sébastien, Rosalie et Tristan, pour avoir parfois rendu mon doctorat plus exigeant mais rempli de bonheur.

AVANT-PROPOS

Depuis mes études collégiales (préuniversitaires), j'avais un intérêt pour la recherche, plus particulièrement pour le développement humain. Toutefois, à l'époque, je ne croyais pas que cette vocation m'était accessible. Par la suite, durant mon baccalauréat en intervention en activité physique, je me suis rendu compte que le développement de l'enfant m'intéressait particulièrement. Mon expérience en enseignement de l'éducation physique, du karaté et aussi en tant que moniteur de camp de jour m'a permis de côtoyer des jeunes ayant des troubles de développement et des jeunes qui semblaient ne pas avoir de trouble. En côtoyant le professeur Victor Frak durant mon baccalauréat en tant que son auxiliaire d'enseignement, j'ai découvert la recherche des liens entre les sphères du développement, plus particulièrement entre la motricité et le langage. J'ai donc amorcé ma maîtrise sur le développement de ces liens chez les enfants et, en raison de mon expérience auprès des enfants avec et sans troubles développementaux, j'avais déjà en tête d'effectuer des recherches chez les jeunes ayant un trouble développemental du langage. Ceci est devenu mon projet de doctorat. Un projet exploratoire qui apporte des éléments nouveaux qui pourraient guider les recherches futures pour intervenir auprès de cette population.

Le contenu de cette thèse et des projets qui y sont liés a été publié ou présenté dans les productions scientifiques suivantes :

- Reggin, L. D., Gomez Franco, L. E., Horchak, O. V., *Labrecque, D., Lana, N., Rio, L. & Vigliocco G. (2023). « Consensus Paper: Situated and Embodied Language Acquisition » *Journal of Cognition*, 6(1): 63, pp. 1–16. DOI: <https://doi.org/10.5334/joc.308>.
- Frak V; *Labrecque D.; Cohen H. (2021) «Action verbs drive motor activity in adolescents but not in children». *Brain and Cognition*. Vol. 148 <https://doi.org/10.1016/j.bandc.2020.105673>
- *Labrecque, D., Frak, C., & Frak, V., (2021, Septembre 20-29). Exploring the motor grounding hypothesis in patients with Developmental Language Disorder. *Embodied and Situated Language Processing Conference: Current Directions and Future Perspectives*. <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.10527.23204>
- Pérez-Guay Juárez F., *Labrecque D. et Frak V. (2019) « Assessing language-induced motor activity through Event Related Potentials and the Grip Force Sensor ». *Brain and Cognition*. Vol. 135 <https://doi.org/10.1016/j.bandc.2019.05.010>
- *Labrecque D., Pérez-Guay Juárez F. et Frak V. (2018) « L’attention sur les mots d’action, une approche en réadaptation ». *Carrefour des connaissances*. Montréal. <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.32051.94246>
- Pérez-Guay Juárez F., *Labrecque D. et Frak V. (2018) « From brain to hand : electrophysical correlates of language-induced motor activity ». *Conférence Mouvement and Cognition de Harvard*. Cambridge (US). <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.24502.19526>
- da Silva, R.L, *Labrecque D., Aparecida Caromano, F., Higgins J. & Frak V. (2018) «Manual action-verbs modulates the grip force of each hand at unimanual

- or symmetrical bimanual tasks.» PloS ONE 13(2): e0192320.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0192320>
- *Labrecque D., Saives, A., Clément, J., Ariza Gomes de Castros, A. et Frak V. (2017) « Supplementay motor area : A view from the left hand of the grip force modulation in unimanual and bimanual symmetric task ». Colloque étudiant du CRIR. Montréal. <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.30482.66241>
 - Saives, A., Clément, J., *Labrecque D., Ariza Gomes de Castros, A. et Frak V. (2017) « Mise en évidence d'une transition sémantique par la modulation de la force de préhension bimanuelle par le langage lors du développement moteur de l'enfant ». Colloque étudiant du CRIR. Montréal. <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.27127.21923>
 - *Labrecque D., Leroux-Descheneaux R. Ariza Gomes de Castros, A. & Frak V. (2016) « Portable device validation to study the relation between motor activity and language: Verify the embodiment theory through grip force modulation. » International Journal of Engineering Research & Technology, 5(12), p. 5-10 <http://dx.doi.org/10.17577/IJERTV5IS120003>
 - Labrecque, D. (2016). *Étude de la latéralisation de l'activité motrice induite par le langage chez l'être humain entre 5 et 18 ans* [Université du Québec À Montréal]. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.14769.79201>
 - *Labrecque D., Leroux-Descheneaux R. et Frak V. (2016) « Exploration des liens entre le langage et l'activité motrice chez les adolescents : validation d'un appareil portatif utilisé dans un protocole d'analyse de l'activité motrice suite à des stimuli linguistiques ». Discipline Neurosciences. 84^e congrès de l'ACFAS. Montréal. <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.19335.27042>
 - Leroux-Descheneaux R., *Labrecque D. et Frak V. (2016) « L'influence de l'activité linguistique en lien avec le développement moteur de l'enfant et de l'adolescent de 5 à 18 ans ». Discipline Neurosciences. 84^e congrès de l'ACFAS. Montréal. <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.15979.82726>

- *Labrecque D., Leroux-Descheneaux Rémi et Frak V. (2016) « Étude de la latéralisation de l'activité motrice induite par le langage chez l'être humain entre 5 et 17 ans ». Colloque étudiant du CRIR. Montréal.
<http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.29401.60004>
- Frak V., Sales Brom A., Gomes de Castro A., Gonçalves de Menezes J.C., *Labrecque D., Leroux-Descheneaux R., Drolet R. et Costa de souza A.M. (2013) « Développement chez l'enfant de l'activité motrice induite par le langage : Dispositif expérimental », présenté au congrès du CRER à Goiânia, Brésil.
<http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.16949.76004>

TABLE DES MATIÈRES

AVANT-PROPOS	iv
LISTE DES FIGURES	xii
LISTE DES TABLEAUX	xiv
LISTE DES ABRÉVIATIONS, DES SIGLES ET DES ACRONYMES.....	xvii
LISTE DES SYMBOLES ET DES UNITÉS	xviii
RÉSUMÉ	xix
ABSTRACT	xx
INTRODUCTION	1
Question de recherche.....	9
Organisation du projet de recherche	10
CHAPITRE I Cadre théorique.....	11
1.1 Le trouble développemental du langage	11
1.1.1 Les ouvrages médicaux de référence	11
1.1.1.1 DSM-5.....	12
1.1.1.2 CIM-11.....	14
1.1.1.3 Différences entre DSM-5 et CIM-11	16
1.1.2 Ancienne nomenclature du TDL	16
1.2 Motricité et langage : traitement sémantique et participation des aires motrices 20	
1.2.1 Sémantique et fenêtres d'accès lexicales	20
1.2.2 Simulation motrice	21

1.2.3	Apprentissage incarné et études comportementales.....	22
1.2.4	Apprentissage incarné	26
1.2.5	Les capteurs de la force de préhension (Grip force Sensor), qu'est-ce que cette technique ? Retour sur la littérature utilisant cette technique.....	28
1.3	Analyse de groupe vs Analyse « single-subject »	32
CHAPITRE II Expérimentation 1A.....		34
2.1	Introduction	34
2.2	Méthodologie	38
2.2.1	Participant.....	38
2.2.2	Matériels d'expérimentation	38
2.2.2.1	Matériels physiques	38
2.2.2.1.1	Capteurs de force	38
2.2.2.1.2	Électroencéphalogramme	39
2.2.2.2	Matériel numérique	39
2.2.2.2.1	Stimuli	39
2.2.3	Protocole.....	40
2.2.4	Traitement des données.....	42
2.2.4.1	Électroencéphalogramme.....	42
2.2.4.2	Capteurs de force	42
2.2.5	Analyse des données	43
2.2.5.1	Électroencéphalogramme.....	43
2.2.5.2	Capteurs de force	43
2.3	Résultats	44
2.3.1	Effets cible, p300 pariétal.....	44
2.3.2	Effets p200 central	46
2.3.3	Modulation la force de préhension.....	48
2.3.4	Corrélations entre la p200 et la modulation de la force.	50
2.4	Discussion	52
2.5	Conclusion.....	55
CHAPITRE III Expérimentation 1B.....		57
3.1	Introduction	57
3.2	Méthodologie	60
3.2.1	Participants	60
3.2.2	Analyses statistiques	61

3.3 Résultats	62
3.4 Discussion	68
3.4.1 La comparaison directe de l'effet de mots d'action et de non-action dans les analyses individuelles versus celles de groupes.....	69
3.4.2 La comparaison avec la ligne de base, un possible indicateur de la présence des liens entre la motricité et le langage.	72
3.5 Conclusion.....	76
 CHAPITRE IV Expérimentation 2.....	 77
4.1 Introduction.....	77
4.2 Méthodologie	80
4.2.1 Participants	80
4.2.2 Matériels d'expérimentation	81
4.2.2.1 Matériels physiques	81
4.2.2.2 Matériels numériques.....	81
4.2.3 Protocole.....	82
4.2.4 Traitement des données des capteurs de force	83
4.2.5 Traitement des données du CCC-2.....	83
4.2.6 Analyses statistiques	84
4.3 Résultats	85
4.3.1 Modulations de la force de préhension	85
4.3.2 Corrélations entre les modulations de la force et les résultats du questionnaire CCC-2	87
4.4 Discussion.	87
4.4.1 L'absence de corrélation	89
4.4.2 Main gauche : l'absence de modulations chez la majorité de nos participants	89
4.4.3 Les cas de modulations neutres et inférieures à la ligne de base	91
4.4.4 Les mots d'action dans la main droite : présence et absence	95
4.4.5 Limites et applications	98
 Conclusion Générale.....	 100
 ANNEXE A Listes de mots (stimuli)	 106
 ANNEXE B Résultats Expérimentation 1B	 109

ANNEXE C Résultats expérimentation 2.....	122
APPENDICE A Fiche des participants (expérimentation 1A et 1B).....	131
APPENDICE B Fiche des participants (expérimentation 2)	134
RÉFÉRENCES	138

LISTE DES FIGURES

Figure	Page
Figure 1.1 Langage et simulation motrice	21
Figure 1.2 Réseau fronto-pariéto-temporal gauche expliquant les liens fonctionnels entre le langage et la motricité (Stout et Chaminade 2012).	22
Figure 2.1 : Capteur de force	38
Figure 2.2 : Matériel portatif	38
Figure 2.3 : Casque Biosemi	39
Figure 2.4 : L'effet cible p3b (image extraite de l'article Juárez et al. (2019)).	44
Figure 2.4 : L'effet cible p3b (image extraite de l'article Juárez et al. (2019)).	45
Figure 2.5 Composante p200 CPz (image extraite de l'article Juárez et al. (2019)).	46
Figure 2.6 Graphiques comparatifs des modulations de la force de préhension pour chaque main (image extraite de l'article Juárez et al. (2019)).	48
Figure 2.7 Nuages de points illustrant la distribution des données pour chaque corrélation. (image extraite de l'article Juárez et al. (2019)).	51

Figure 3.1 Graphiques des modulations de la force de la main droite des participants 7 (au-dessus) et 10 (en dessous).	70
Figure 3.2 Graphique des MF du Participant 11.	72
Figure 3.3 Graphique des MF Participation 4 (main droite)	73
Figure 4.1 Graphiques des MF moyennes par participant de la main gauche à la suite de l'écoute de mots d'action pour le groupe contrôle (exp. 1B) (graphique du haut) et le groupe ayant un TDL (graphique du bas)	89
Figure 4.1 Graphiques des MF moyennes par participant de la main gauche à la suite de l'écoute de mots d'action pour le groupe contrôle (exp. 1B) (graphique du haut) et le groupe ayant un TDL (graphique du bas)	90
Figure 4.2 Graphique des MF du participant 9	91
Figure 4.3 Graphique des modulations de la force de la main gauche des enfants ayant entre 5 et 11 ans (Labrecque et al. 2016)	92
Figure 4.4 Graphiques des modulations de la force des participants 5 (au-dessus) et 13 (en dessous)	93
Figure 4.5 Graphiques des participants 3 (1 ^{re} rangée à gauche) ; participant 7 (1 ^{re} rangée à droite) ; participant 8 (2 ^e rangée à gauche) ; participant 11 (2 ^e rangée à droite) ; participant 12 (3 ^e rangée)	97

LISTE DES TABLEAUX

Tableau	Page
Tableau 1.1 Voici un tableau pour faire le parallèle entre les ouvrages médicaux récents et la classification de (Gérard, 1993).	18
Tableau 2.1 Valeurs descriptives de l'amplitude dans les électrodes d'intérêts (Cz, CPz et C3 pour la p200 et regroupement pariétal pour la p300).	47
Tableau 2.2 Résultats de l'analyse comparative des modulations de la force de préhension à la ligne de base par condition pour les mots cibles.	49
Tableau 2.3 Résultats de l'analyse des différences interconditions des modulations de la force de préhension pour les mots cibles.	50
Tableau 3.1 : Sommaire des résultats des ANOVA intraconditions par participant du changement de la modulation de la force dans le temps. Résultats complets en Annexe B tableau 4.7.	63
Tableau 3.2 : Sommaire des résultats du post hoc LSD entre les modulations préstimuli et poststimuli. Résultats complets en Annexe B, tableau 4.8.	65
Tableau 3.3 : Sommaire des résultats des ANOVAs interconditions par participant. Résultats complets en Annexe B tableau 4.9.	67

Tableau 3.4 Dénombrement des participants dont les modulations sont supérieures à la ligne de base.	72
Tableau 3.5 Valeurs d'écart-type des participants par fenêtre de temps.	75
Tableau 4.1 Sommaire des résultats des ANOVAs intraconditions par participant du changement de la modulation de la force dans le temps. Résultats complets en Annexe C, tableau 4.12.	85
Tableau 4.2 Sommaire des résultats du post hoc LSD entre les modulations préstimuli et poststimuli. Résultats complets en Annexe D, tableau 4.13.	86
Tableau 4.3 Nombre et pourcentage de participants dont les modulations de la force sont supérieures à la ligne de base dans le groupe contrôle (exp. 1B) et le groupe ayant un TDL.	88
Tableau 4.4 Liste des mots de non-action (noms)	106
Tableau 4.5 Liste de mots d'action (verbes).....	107
Tableau 4.6 Sphéricité ANOVAs intraconditions pour le groupe contrôle.....	109
Tableau 4.7 Résultats des ANOVAs intracondition du groupe contrôle.....	111
Tableau 4.8 Résultats post hoc LSD entre les MF poststimuli (en trois fenêtres) et la force pré stimuli du groupe contrôle.....	113
Tableau 4.9 Résultats des ANOVAs intercondition par participant du groupe contrôle.	119

Tableau 4.10 Résultats des tests des rangs signés Wilcoxon entre les résultats des répondants au questionnaire CCC-2 (z-score).....	122
Tableau 4.11 Sphéricité pour chaque ANOVA du groupe trouble de langage.....	123
Tableau 4.12 Résultats des ANOVAs intracondition du groupe trouble de langage	124
Tableau 4.13 Résultats post hoc LSD entre les MF poststimuli (en trois fenêtres) et la force pré stimuli du groupe trouble de langage	126

LISTE DES ABRÉVIATIONS, DES SIGLES ET DES ACRONYMES

TDL	Trouble développemental du langage
MF	Modulations de force
CCC-2	Children's communication checklist 2 ^e édition.
ES	Erreur standard

LISTE DES SYMBOLES ET DES UNITÉS

Hz : Hertz

ms : Milliseconde

N : Newton

mN : Millinewton

Kohms : 1000 ohms

μ V : microvolt

RÉSUMÉ

Ce projet exploratoire a pour but de vérifier si les jeunes ayant un trouble développemental du langage ont des perturbations des liens fonctionnels entre les réseaux cérébraux du langage et de la motricité. La confirmation de la présence de ces perturbations nous indiquerait si l'inclusion du mouvement dans les interventions cliniques ou pédagogiques auprès de ces jeunes pourrait s'avérer bénéfique dans l'apprentissage du langage comme dans le cas de l'aphasie. Ensuite, l'hétérogénéité du trouble développemental du langage exige une approche analytique plus individualisée de notre part. Nous opterons donc pour un design expérimental « single-subject ». Pour y arriver, nous avons divisé le projet en trois étapes. Lors de la première étape, nous avons reproduit les résultats des analyses de la modulation de la force et des corrélats électrophysiologiques qui représentent le traitement sémantique des classes de mots pour démontrer les corrélations statistiques et temporelles entre ces techniques d'analyse en temps réel. Les modifications méthodologiques amenées dans la première étude, quant au nombre de stimuli utilisés avec les capteurs de force, nous ont permis durant la deuxième étape de réaliser la première analyse « single-subject » des modulations de la force de préhension. Les résultats nous ont permis d'identifier la méthode statistique qui a pour fonction de valider la présence de liens entre la motricité et le langage chez une population neurotypique. Nous avons alors trouvé un effet homogène entre les participants de l'effet des mots d'action sur les modulations de la force de préhension de la main droite. Ces modulations supérieures à la ligne de base dans cette condition semblent être un indicateur de la présence des liens que nous recherchions. Finalement, nous avons pu vérifier la présence de ces liens chez une population d'adolescents ayant un trouble développemental du langage. En les comparant avec la population contrôle de l'étape précédente du projet, nous avons pu constater qu'une partie de la population avec un trouble développemental du langage semble disposer d'un réseau motricité et langage fonctionnel, du moins en partie. Pour les autres, ils semblent avoir un *motor grounding deficit*. Ces résultats nous portent à croire qu'au moins une partie de la population avec un trouble développemental du langage serait positivement sensible à l'ajout du mouvement dans les interventions cliniques et pédagogiques.

Mots clés : Trouble Développemental du Langage, Langage, Motricité, Cognition Incarnée, Modulation de la force de préhension, « Single-subject »

ABSTRACT

The goal of this exploratory project is to identify if there is a functional link between the language and motor brain networks among adolescents with developmental language disorders. The presence of a functional link would indicate whether the inclusion of movement in clinical or pedagogical interventions among these adolescents could be beneficial towards their language learning as is the case among individuals with aphasia. The heterogeneity of the developmental language disorder requires the use of an individualized analytical approach. Accordingly, we used single-subject experimental design. To do so, we divided the project into three steps. First, we reproduced the results of the grip force modulation analysis and the evoked potential which characterized the class-word semantic processing to demonstrate the statistical and temporal correlations between these real-time analysis techniques. Second, the methodological modifications brought in the first study, regarding the number of stimuli used with the force sensors, allowed us to make the first single-subject analysis of the grip force modulation. These results allowed us to identify the statistical method to validate the presence of motor-language links on an individual level. We found a homogenous effect across participants on the effect of action words on right hand grip force modulations. These above baseline modulations in this condition appear to be an indicator of the presence of the links we were looking for. Third, we tested for the presence of these links among adolescents with developmental language disorders. By comparing the results from the control group in the second step and the results from the developmental language population in the third step, we found that approximately around half of the adolescents with developmental language disorders present functional links, at least partially. The remaining participants seem to have a *motor grounding deficit*. These results lead us to believe that individuals with a developmental language disorder would be positively sensitive to the addition of movement in clinical and educational interventions.

Keywords : Developmental Language Disorder, Language, Motor system, Embodied cognition, Grip force Modulation, Single-subject

INTRODUCTION

La dysphasie est un trouble invisible parmi la population. Sa dernière appellation officielle est le trouble développemental du langage (TDL) ou « developmental language disorder » en anglais. Selon le contexte et la sévérité du trouble, entre adultes non avertis, nous pouvons discuter avec une personne ayant un TDL sans nous en apercevoir. J'étais enseignant d'éducation physique et, avant d'accueillir dans mon gymnase les élèves que je croisais dans les corridors, je ne pouvais pas savoir lesquels étaient aux prises avec un TDL. Les écoles où j'ai travaillé comptaient autant de classes pour les enfants dysphasiques que de classes pour les enfants ayant un trouble du spectre de l'autisme. À l'époque de mon baccalauréat, connaissant peu ce trouble, je croyais que la prévalence de ces deux troubles développementaux était similaire. Il semble que mon observation se généralisait aux écoles québécoises. En utilisant les données pour l'année scolaire 2020-2021 de l'Institut de la statistique du Québec, on peut calculer que 1,85 % des élèves québécois ont la cote 50 (troubles envahissants du développement) et 1,03 % ont la cote 34 (déficience langagière). Toutefois, l'Ordre des orthophonistes et audiologistes du Québec (OOAQ) parle de 9,4 % de la population qui est classée dysphasique vers l'âge de 5 ans. Dans 72 % des cas, le diagnostic se maintient après 12 ans, ce qui veut dire qu'à l'adolescence, 6,8 % des adolescents sont toujours classés dysphasiques.

Dans les écoles québécoises, où sont ces 5,77 % (6,8 %-1,03 %) qui ne sont pas classés déficience langagière ? En théorie, ils sont classés parmi les élèves avec des difficultés d'apprentissage, dans la catégorie « autres difficultés ». Ceux-là ont un TDL « léger à moyen » selon le gouvernement. Ils doivent bénéficier d'un plan d'intervention et d'un

suivi, mais ils n'ont pas accès à un suivi régulier avec une orthophoniste. Un élève dysphasique recevra la cote 34 s'il rencontre des difficultés expressives très marquées et des difficultés modérées à sévères sur le plan de la compréhension. Comment se fait-il que l'OOAQ présente cette statistique sur un trouble qui est médicalement documenté, mais que seulement 1 enfant sur 7 avec TDL reçoive les services du gouvernement ? Ce problème, souligné par Breault et al. (2019) dans leur mise à jour interdisciplinaire du TDL, remonterait aux années 1980 alors que les chercheurs de l'époque évoquaient déjà la manière dont les écarts de prévalence dans la littérature affectaient l'offre de service à la baisse.

Si le TDL a eu aussi longtemps des prévalences si différentes dans la littérature, c'est parce que le trouble est très hétérogène. Les jeunes qui ont un TDL peuvent avoir des atteintes sur le plan de leur vocabulaire (lexique), de l'organisation des mots pour faire des phrases (syntaxe), du sens des mots et des phrases (sémantique), de la formulation des mots (morphologique), de la perception, manipulation et organisation des sons qui forment les mots (phonologie) et de l'utilisation de la langue dans son contexte d'utilisation, soit les règles de la conversation (pragmatique). Les jeunes n'ont pas tous les mêmes atteintes. Par le passé, des profils de dysphasie ont été proposés en liant les difficultés avec les atteintes neurologiques (Gérard, 1993 ; Rapin et Allen, 1983), mais il se trouve que les personnes ayant un TDL évoluent dans leurs troubles et que les atteintes majeures (ex. : sémantique, syntaxique, etc.) changent au cours de leur développement. Si l'on retrace des origines génétiques à ces troubles (Bonneau et al., 2004 ; Eicher et al., 2016 ; Vernes et al., 2008), les origines neurologiques ne sont toujours pas claires. Les recherches sur les aires corticales qui seraient en cause pour le trouble ont des résultats contradictoires (Billard, 2007 ; Chiron et al., 1999 ; de Guibert et al., 2011 ; Guiraud et al., 2018 ; Liégeois et al., 2014 ; Mayes et al., 2015).

Depuis 2016, à la suite du projet CATALISE, qui regroupait 57 experts internationaux et interdisciplinaires, le terme TDL a été accepté par une majorité de chercheurs avec des critères d'inclusion et d'exclusion (similaire au DSM V). Cela n'a que peu changé l'approche clinique. L'objectif est d'avoir un meilleur arrimage entre la réalité clinique et la recherche. Auparavant, les appellations trouble spécifique du langage ou trouble primaire du langage (ancienne appellation du TDL) étaient privilégiées dans la littérature et accompagnées de critères d'exclusion et d'inclusion qui allaient vers une déficience langagière dite pure (qui est très rare) en excluant les comorbidités.

Lors de TDL, on sait que le développement cérébral et des fonctions cognitives est altéré, mais on ne peut pas identifier la ou les aires cérébrales en cause. L'une des théories qui obtient le plus d'appui est celle du déficit procédural. (Ullman et al., 2020 ; Ullman et Pierpont, 2005). Le circuit de la mémoire procédurale serait dysfonctionnel et en fonction des aires atteintes, cela donnerait un trouble d'apprentissage parmi lesquels le TDL, le trouble développemental de la coordination ou d'autres troubles d'apprentissage (dyslexie, dysorthographe). La mémoire procédurale englobe les aires sous-corticales comme les ganglions de la base, le thalamus ainsi que les cortex frontal et pariétal. La théorie du déficit procédural est basée sur le concept que l'apprentissage par l'utilisation de la mémoire procédurale est un apprentissage implicite. Ceux-ci sont faits sans intervention externe (sans reconnaissance et de rétroaction sur la réussite de l'apprentissage), sans qu'on se rende compte que l'on est en train d'apprendre et c'est un apprentissage difficile à exprimer verbalement (Lechevalier et Habas, 2021). Toutefois, autant sur le plan conceptuel (mémoire procédurale égale apprentissage implicite) que du point de vue neuroanatomique (les aires nommées précédemment), il y a quasiment autant d'études qui approuvent que d'études qui désapprouvent cette théorie (Krishnan et Watkins, 2019 ; West et al., 2018, 2019).

Le TDL est un trouble qu'il faut continuer à étudier afin d'aider ces jeunes présentant ces difficultés linguistiques pour les soutenir dans leur parcours scolaire, leur possibilité de travail, leur vie sociale et leur bien-être. De ce fait, il importe de continuer à améliorer les méthodes d'apprentissage des composantes du langage (Billard, 2007). Avec l'avancement de la recherche et de notre vision du monde, il faut examiner ce trouble sous un nouvel angle.

Ayant une formation en enseignement de l'activité physique, je considère le corps et la motricité comme des sujets d'étude importants et, à la suite de mes interactions avec des élèves ayant un TDL, je me suis particulièrement intéressé au lien entre la motricité et le langage. L'une des théories qui permettent d'interpréter ce lien est la cognition incarnée (embodied cognition). Selon cette théorie, nos apprentissages sont le fruit de l'interaction entre notre environnement, notre corps et notre conscience. Notre perception et notre corps influencent la manière dont nous interagissons avec notre environnement et l'environnement influence notre perception, le tout enracinant (grounded) nos apprentissages dans notre corps. Ce concept s'applique à différents éléments de la cognition, mais pour le langage, le principe théorique repose sur le fait que la compréhension des mots active les aires cérébrales liées au sens du mot. Le nom d'une couleur active les aires visuelles ou, dans le cas qui nous intéresse, un mot d'action active les aires sensorimotrices. Hauk et al. (2004) sont parmi les premiers à démontrer une activation somatotopique à la lecture de mots d'action liés à une partie du corps. Par la suite, les multiples études ont démontré les liens entre l'activité cérébrale des aires du langage et celles de la motricité. Parmi les différentes recherches, l'utilisation de diverses méthodes telles que l'électroencéphalographie (EEG), la magnétoencéphalographie (MEG), l'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle (IRMf) et, plus récemment, la stimulation magnétique transcrânienne (TMS) sont très fréquemment utilisées pour explorer l'activation et l'intégration des aires sensorimotrices avec le langage (Hauk et Tschentscher, 2013).

Sur le plan pratique, de plus en plus de protocoles de thérapie intègrent ces concepts en incluant le mouvement, l'observation et l'imagerie en réadaptation langagière pour différentes formes d'aphasies. C'est Marangolo et al. (2010) qui ont jeté les bases de ces concepts en réadaptation du langage. Si les recherches qui ont suivi ont confirmé ces résultats en application clinique (Durand et al., 2018, 2021 ; Ghio et al., 2018), il semblerait qu'à l'heure actuelle aucun projet de recherche ne se soit intéressé à la question pour les enfants ayant un TDL.

Lors de la création de ce projet de recherche, j'ai consulté deux orthophonistes travaillant avec les jeunes ayant un TDL. Ils m'ont décrit les séances d'orthophonie comme étant très statiques. L'enfant n'est pas très engagé sur le plan corporel. L'inclusion du mouvement avec l'apprentissage linguistique ne fait pas partie de la formation et s'il y a inclusion du mouvement dans les séances, il semble que cela soit un choix personnel de l'orthophoniste.

Il semblerait intéressant de tester l'efficacité de thérapies qui incluent le mouvement dans l'apprentissage du langage. De plus, cela pourrait dépasser l'aspect thérapeutique et s'étendre aux interventions pédagogiques en liant les apprentissages faits en classe avec des activités réalisées lors des cours d'éducation physique. Cela pourrait favoriser la consolidation des apprentissages et renforcer l'intervention de l'orthophoniste. Toutefois, à la différence de l'aphasie, dont la majorité des patients n'avait pas d'atteinte dans les réseaux cérébraux du langage et de la motricité avant l'incident qui a causé leur aphasie, ceux ayant un TDL doivent composer avec un réseau langagier altéré et plusieurs ont aussi un réseau moteur altéré (très grande comorbidité avec le trouble développemental de la coordination (Albaret, 2001 ; Flapper et Schoemaker, 2013)). Par conséquent, il serait judicieux de vérifier la présence du lien entre le langage et la motricité chez cette population ayant un TDL avant d'envisager des essais cliniques.

Une technique présentée en 2010 par Frak et al. permet de vérifier la présence des liens entre le langage et la motricité dans la population ayant un TDL. Les capteurs de la force de préhension permettent d'enregistrer les changements de force involontaires de la préhension qui sont induits par les stimuli linguistiques. Les changements de force sont modulés en fonction de la résonance motrice des mots. Si ceux-ci ont une forte résonance motrice comme des verbes d'action manuelle, les modulations sont plus importantes comparativement aux mots ayant moins de résonance motrice, comme des noms tels qu'avion ou requin. Un modèle portable des capteurs de force a été conçu et validé (Labrecque *et al.*, 2016). Ce modèle portable a permis de réaliser des collectes de données auprès d'enfants dans des écoles au Québec et au Brésil. Grâce à cela, nous avons été en mesure de documenter l'évolution des liens entre la motricité et le langage à travers le développement (Frak *et al.*, 2021).

Cette technique est idéale, car elle donne la possibilité de vérifier la présence des liens entre la motricité et le langage tout en étant à proximité de la population recherchée (écoles, organismes communautaires et centres intégrés de santé et de services sociaux). En plus d'être faites dans un milieu familier pour les jeunes, les expérimentations ne sont pas très exigeantes pour les participants, car elles ne nécessitent qu'une séance d'environ une heure.

Toutefois, on doit prendre en compte l'hétérogénéité du TDL. L'approche par analyse de groupes pourrait faussement nous indiquer l'absence ou la présence du lien motricité et langage. Donc, une approche dite « single-subject » nous permettrait de vérifier la présence du lien chez chaque participant. Il faut avant tout vérifier que cette approche nous donne des résultats similaires à l'approche de groupes avec une population similaire à celle présente dans la littérature.

Dans le cadre d'une collaboration entre le laboratoire Cerveau, Motricité et Langage (CML) et le laboratoire Cognition et Communication, nous avons monté une expérimentation dans laquelle nous jumelions les capteurs de force avec un électroencéphalogramme. Cela nous permettait de vérifier les corrélations statistiques et temporelles entre les modulations de la force de préhension et les corrélats électrophysiologiques qui représentent le traitement sémantique en fonction des classes de mots (action/non-action). Afin d'être jumelé à l'électroencéphalogramme nous avons adapté la méthodologie et augmenté le nombre de stimuli comparativement au projet antérieur afin de donner plus de validité à l'effet des stimuli linguistiques sur la force de préhension. Cela a permis de voir si l'activité involontaire lors de la préhension est liée à l'activité cérébrale normalement présente lors du traitement sémantique selon les classes de mots. Finalement, l'augmentation du nombre de stimuli nous donne la possibilité de vérifier la présence du lien entre motricité et langage à l'échelle individuelle.

Pour terminer l'introduction, je tiens à souligner les modifications apportées au projet initialement proposé, dues aux avancements de la recherche et à la pandémie. À l'origine, le projet voulait mettre en lien les régions du cerveau affectées en fonction des résultats avec les capteurs de force et des difficultés linguistiques des participants. Toutefois, la très grande hétérogénéité du TDL, avec les nombreuses comorbidités qui sont maintenant acceptées et le nombre de participants qui a été limité par la pandémie ont fait en sorte que nous nous sommes tournés vers une approche plus fonctionnelle et en lien avec une application clinique et/ou pédagogique que neuroanatomique du lien motricité et langage. Nous n'avions pas assez de participants pour faire plusieurs catégories de réponses motrices aux stimuli qui seraient liables avec des régions du réseau cérébral, langage et motricité. Certains liens seront présentés, sans toutefois pouvoir les généraliser. Ensuite, il aurait été préférable d'avoir un échantillon plus grand de notre population ayant un TDL ainsi qu'un groupe contrôle du même âge.

Cependant, l'expérimentation a débuté avec les adolescents ayant un TDL et elle a été interrompue par la pandémie. Il était impossible de reprendre la collecte de données pour les deux groupes. La comparaison des données du groupe ayant un TDL se fera avec le groupe d'adultes de la première expérimentation, car les résultats des recherches sur les adolescents montrent des modulations de la force aux mots d'action et de non-action (Frak *et al.*, 2021) similaires à celles des adultes (da Silva *et al.*, 2018 ; Frak *et al.*, 2010 ; Nazir *et al.*, 2017) dans les analyses en groupes. Nous généraliserons aux analyses individuelles, mais nous reviendrons sur les limites de cette approche dans la conclusion. Malgré ces lacunes, ce projet présente des résultats intéressants qui doivent être partagés pour envisager la suite de la recherche (théorique et clinique) sur le lien entre la motricité et le langage chez la population ayant un TDL.

QUESTION DE RECHERCHE

La question principale est :

Est-ce que les adolescents âgés de plus de 13 ans ayant un TDL présentent des liens entre la motricité et le langage ?

Pour y répondre, il a fallu préalablement vérifier si nous pouvions reproduire les résultats de groupes dans une méthodologie ajustée pour faire du « single-subject » et, du même coup, vérifier les corrélations temporelle et statistique du traitement sémantique selon les classes de mots dans la modulation de la force et les corrélats électrophysiologiques.

Ensuite, nous devons répondre à une autre question. Est-ce que nous pouvons démontrer le lien entre la motricité et le langage chez les individus sans trouble neurologique par une analyse « single subject » ?

Cela nous permet de revenir à notre question principale et de vérifier si les adolescents ayant un TDL présentent des modulations de la force de préhension dues aux stimuli linguistiques similaires ou différentes d'une population sans trouble neurologique.

ORGANISATION DU PROJET DE RECHERCHE

En premier lieu, je présenterai les résultats de la collaboration entre le laboratoire CML et le laboratoire Communication et Cognition, qui a pris la forme d'un article ayant été publié dans le journal *Brain and Cognition* en 2019. L'article s'intitule : « Assessing language-induced motor activity through Event Related Potentials and Grip Force Sensor, an exploratory study ».

Deuxièmement, je dévoilerai le second volet de cette expérimentation qui constitue une analyse « single-subject » des données des capteurs de force recueillies dans l'expérimentation précédente.

Troisièmement, je relaterai l'expérimentation réalisée auprès d'adolescents ayant un TDL à l'aide de la même approche qu'au second volet de la première expérimentation.

Avant de présenter les expériences 1A (capteurs de force et électroencéphalogramme), 1B (Analyse « single-subject » chez un groupe d'adultes neurotypiques) et 2 (Analyse « single-subject » chez un groupe d'adolescents ayant un TDL), le cadre théorique général sera présenté. Après la présentation des trois expérimentations, une conclusion résumera les résultats des trois étapes du projet. Je présenterai les applications et les limites ainsi que la suite possible des recherches sur le TDL et le lien entre la motricité et le langage.

CHAPITRE I

CADRE THÉORIQUE

Dans ce chapitre, il sera question du TDL, de son diagnostic et de sa nomenclature ; des liens fonctionnels et cérébraux du langage et de la motricité ; l'apport des recherches comportementales sur ces liens ; l'apprentissage à l'aide du corps ; de même que de l'utilisation et de l'apport scientifique des capteurs de force et des approches méthodologiques d'analyse de groupes et d'analyse « single-subject ».

1.1 Le trouble développemental du langage

Il a déjà été souligné que le TDL est un trouble hétérogène. Nous reviendrons sur sa classification et son diagnostic passé et présent.

1.1.1 Les ouvrages médicaux de référence

Actuellement, dans la communauté médicale, deux ouvrages incluent le TDL sous d'autres noms. L'ouvrage de référence utilisé par les médecins en Amérique du Nord est la 5^e édition révisée du « Diagnostic and Statistical Manual of Mental Disorders » (DSM-5) (American Psychiatric Association, 2013). Une version révisée est sortie en mars 2022 (American Psychiatric Association, 2022) avec certains ajustements. Ils

seront soulignés dans la section sur le présent ouvrage. Sur le plan international, l'Organisation mondiale de la Santé (OMS) a publié en 2018 la 11^e édition de la « Classification internationale des maladies » (CIM-11) dont la dernière version est datée de 2022.

Nous retrouvons des caractéristiques communes dans la description et les critères de diagnostic des deux ouvrages. Premièrement, le trouble de langage est diagnostiqué en excluant tout autre trouble neurologique comme l'origine des difficultés linguistiques. Deuxièmement, pour être un trouble, ces difficultés doivent être persistantes à travers le temps en plus d'handicaper de façon importante l'individu dans les sphères de la vie où la communication est cruciale, telles que l'éducation ou le travail. Le diagnostic est posé à l'aide de l'histoire de l'individu, l'observation clinique dans différents contextes et le pointage à un test d'habileté linguistique standardisé. Le diagnostic est difficile à faire avant 4 ans et il faut tenir compte des variations régionales, sociales ou culturelles de la langue.

1.1.1.1 DSM-5

Dans le DSM-5, les troubles développementaux englobent les troubles de la communication, ce qui inclut le trouble du langage, le trouble de la parole et de la phonologie, le trouble du bégaiement débutant dans l'enfance, le trouble de la communication sociale-pragmatique et le trouble de la communication non spécifié. Le TDL s'intègre au trouble du langage et au trouble de la communication sociale-pragmatique du DSM-5. Nous comparerons aussi brièvement l'actuelle classification du DSM-5 à celle des versions précédentes. La cinquième édition du DSM s'est démarquée de la précédente en combinant le trouble du langage expressif et le trouble du langage mixte (réceptif-expressif) sous le trouble du langage et en distinguant le trouble de la communication sociale-pragmatique du trouble de langue.

Le trouble du langage (315.32 (F80.2)) :

Le trouble est décrit comme le fait de présenter des difficultés persistantes dans l'acquisition du langage à travers diverses modalités dues à un déficit de la compréhension ou de l'expression. Les difficultés peuvent être un vocabulaire réduit, des structures de phrase limitées, ou encore un discours incohérent. Les enfants aux prises avec ce trouble ont des capacités linguistiques en dessous de ce à quoi on s'attend à leur âge chronologique.

Dans la dernière version, le DSM-5-TR, les éléments suivants ont été ajoutés : un paragraphe a été ajouté pour souligner que les personnes ayant un trouble de langage peuvent devoir composer avec des conséquences sociales tout le long de leur vie. Les enfants sont plus à risque d'être victimisés par leurs pairs. Chez les femmes ayant eu une enfance marquée par le trouble du langage, on retrouve un risque 3 fois plus important de subir un abus sexuel à l'âge adulte. Il y est de plus spécifié que le bilinguisme ne cause ou n'empire pas le trouble de langage, mais que les enfants bilingues peuvent avoir un développement du langage différent ou retardé. Le trouble de langage affectera alors les deux langues. Deux éléments importants ajoutés à cette version pour le diagnostic sont que le trouble du langage peut être présent avec des degrés variés d'habiletés intellectuelles (dans le contexte de trouble du développement intellectuel) et qu'il n'est pas nécessaire d'avoir une différence entre les habiletés verbales et non verbales pour diagnostiquer le trouble de langage. Concernant le trouble du spectre de l'autisme, un délai est fréquemment observé dans le développement du langage, l'accent est mis sur les comportements qui ne sont pas liés au trouble du langage, mais bien au trouble du spectre de l'autisme comme la rigidité dans la routine, les comportements répétitifs, les patrons de jeux étranges, le peu d'intérêt pour les activités sociales, ou les interactions sociales inhabituelles.

Le trouble de la communication sociale-pragmatique (315.39 (F80.82)) :

Ce trouble se caractérise par une difficulté persistante dans la communication verbale et non verbale selon le contexte, comme le partage d'informations, l'ajustement de son langage en fonction de l'interlocuteur, les règles de la conversation (tour de parole, reformuler une phrase incomprise...) ainsi qu'avec ce qui n'est pas explicite dans la communication (l'humour, les métaphores...).

La classification de ce trouble a un historique bien particulier. Dans le DSM IV, ce trouble était associé au spectre de l'autisme. Cependant, la littérature, même antérieure à la publication de cette édition, faisait déjà état du trouble sans association à l'autisme (Rapin et Allen, 1983). Dans les catégories du TDL qui seront présentées plus bas, nous verrons que ce trouble est inclus comme une catégorie du TDL, alors que dans le DSM-5, il constitue un trouble distinct.

1.1.1.2 CIM-11

La classification internationale des maladies comporte une section sur les troubles du développement de la parole et du langage qui font partie des troubles mentaux, comportementaux et neurodéveloppementaux. Dans cette section, le TDL est représenté en quatre classifications sous le nom de trouble du développement du langage.

Trouble développemental du langage avec altération du langage réceptif et du langage expressif (6A01.20)

Il y est décrit que la capacité à comprendre un langage parlé ou gestuel est nettement inférieure au niveau attendu par rapport à son âge et à son niveau intellectuel. Le sujet

est aussi accompagné d'une incapacité persistante à produire et à utiliser le langage parlé ou gestuel.

Trouble développemental du langage avec trouble du langage essentiellement expressif (6A01.21)

Ce trouble se caractérise par une capacité à comprendre le langage parlé ou gestuel qui reste relativement intact, mais avec des difficultés persistantes dans l'acquisition, la production et l'utilisation du langage affectant ses capacités à produire et à utiliser le langage parlé ou gestuel qui sont nettement inférieures au niveau attendu en fonction de l'âge et du niveau de fonctionnement intellectuel du sujet.

Trouble développemental du langage avec trouble du langage essentiellement pragmatique (6A01.22)

Il est question ici d'une atteinte au langage qui se caractérise par des difficultés persistantes du langage, particulièrement pragmatique. La compréhension et la production du langage dans les autres aspects du langage sont relativement intactes. Ce diagnostic peut être appliqué si les difficultés pragmatiques ne s'expliquent pas par la présence d'un trouble du spectre de l'autisme ou par des atteintes dans la compréhension ou la production du langage.

Trouble développemental du langage, avec d'autres troubles du langage précisés (6A01.23)

Dans cette section, nous décrivons un trouble développemental du langage qui remplit tous les critères que nous avons vus plus haut, mais dont le déficit dans le langage ne s'applique pas aux autres catégories spécifiques mentionnées plus haut.

1.1.1.3 Différences entre DSM-5 et CIM-11

Les deux ouvrages diffèrent dans leur catégorisation du trouble. Le DSM-5 se situe davantage dans le courant de pensée actuel proposé dans le projet CATALISE qui se veut plus global et inclusif, alors que le CIM-11 semble plus suivre les anciennes classifications du trouble de langage en séparant le trouble dit réceptif à celui dit expressif. Nous allons voir ces classifications dans la prochaine section sur les appellations dans la littérature scientifique. Finalement, le CIM-11 crée aussi une catégorie à part pour l'aphasie acquise par l'épilepsie (syndrome Landau-Kleffner). Dans le DSM-5, celle-ci est incluse dans le trouble de langage.

1.1.2 Ancienne nomenclature du TDL

Plusieurs auteurs proposent des types de trouble du langage en fonction des difficultés linguistiques des TDL. Ces classifications ne servent pas au diagnostic médical, dont le diagnostic est fait selon le DSM-5 ou le CIM11 en fonction de leur emplacement géographique, mais plutôt au traitement et à la recherche. Plusieurs classifications ont été suggérées par différents auteurs. Rapin et Allen (1983) ainsi que Gérard (1993) ont marqué la littérature sur le sujet. Voici la classification de Gérard, C.-L. avec des comparaisons avec celle de Rapin et Allen.

Dysphasie phonologique-syntaxe : Les individus éprouvent plus de difficulté dans la production que dans la compréhension. Leur langage se caractérise par une production réduite, agrammatique et déviante du point de vue phonologique. Le lexique aussi est quant à lui réduit. C'est le profil le plus fréquent. Dans la classification précédente de Gérard (1991), un autre profil plus sévère a été inclus à celui-ci, le trouble expressif sévère, aussi présent dans la classification de Rapin et Allen (1983).

Dysphasie phonologique : L'expression des individus est altérée en raison de la déformation des phonèmes, ce qui rend le discours inintelligible. Cependant, leur niveau de compréhension est relativement normal.

Dysphasie lexico-sémantique ou dysphasie mnésique : Ce qui caractérise ce profil du TDL est un lexique particulièrement réduit et une déviance syntaxique. Les longs discours sont aussi difficiles à comprendre, mais sinon la compréhension est relativement normale.

Dysphasie réceptive : Dans ce cas-ci, c'est la compréhension qui est problématique. L'enfant éprouve de la difficulté à comprendre les mots et, parfois, même l'association des sons à leur source peut être affectée. Rapin et Allen (1983) nomment ce profil agnosie auditivo-verbale.

Dysphasie sémantique-pragmatique : Ceux ayant ce profil présentent des difficultés sur les règles de la conversation en fonction du contexte. Ceci donne une impression d'incohérence chez l'interlocuteur en raison de leurs choix lexicaux et syntaxiques erronés. Par exemple, le locuteur peut communiquer de l'information superflue ou ne pas laisser les tours de parole.

Tableau 1.1 Sommaire de la classification du TDL des ouvrages médicaux récents et celle proposé par Gérard (1993).

DSM-5	CIM-11	Classification Gérard (1993)
Le trouble du langage	Trouble développemental du langage avec altération du langage réceptif et du langage expressif	Dysphasie réceptive
	Trouble développemental du langage avec trouble du langage essentiellement expressif	Dysphasie phonologique-syntaxe
		Dysphasie phonologique
		Dysphasie lexicaux-sémantique ou dysphasie mnésique
Le trouble de la communication sociale-pragmatique	Trouble développemental du langage avec trouble du langage essentiellement pragmatique	Dysphasie sémantique-pragmatique

Si la classification de Gérard (1993) semble constituer une bonne solution, un problème persiste. Les enfants atteints du TDL vont généralement passer d'une catégorie à une autre au cours de leur développement. Si cela n'est pas un problème en clinique, alors que le suivi continu permet aux spécialistes de s'ajuster aux besoins changeants de l'enfant, cela s'avère plus problématique en recherche. Les catégories ont été conçues à partir de difficultés linguistiques, mais aussi à partir de corrélats avec les régions cérébrales ayant une activité différente de la normale (Rapin et Allen, 1983). Cependant, les résultats de nombreux travaux aboutissent à des conclusions contradictoires en essayant d'expliquer les difficultés linguistiques à l'aide de localisations cérébrales (Badcock et al., 2012 ; Billard, 2007 ; Chiron et al., 1999 ; de Guibert et al., 2011 ; Krishnan et al., 2016).

Dans la littérature anglophone des années 1980-1990-2000, le terme le plus utilisé était « Specific Language Impairment » dont l'équivalent francophone est le trouble spécifique du langage oral. Dans leur révision du terme, Reilly et al. (2014) reviennent sur son utilisation pour exclure les autres troubles neurologiques pouvant altérer le langage dans l'objectif de créer des groupes plus homogènes. Toutefois, les critères d'exclusions ne font pas consensus dans la littérature. Ensuite, même si les critères d'exclusion permettent de faire des groupes très homogènes, les résultats ne s'appliquent pas nécessairement au milieu clinique dont la réalité est très différente. C'est aussi ce qui explique les résultats contradictoires concernant l'origine neurologique du trouble (Krishnan *et al.*, 2016), ainsi que la prévalence variable du TDL dans la littérature scientifique pendant des années (Breault *et al.*, 2019).

En 2013, le DSM-5 présente le terme « Language disorder », ce qui marque un changement avec les éditions précédentes. Comme nous l'avons expliqué, le diagnostic peut être posé même en présence d'autres troubles qui peuvent affecter le langage, mais il y a un diagnostic de trouble de langage s'il s'agit de la raison principale de l'altération du langage et non d'un autre trouble (ex. : une dyspraxie verbale). En français, certains utilisaient le terme trouble primaire du langage. Ce terme était aussi utilisé pour préciser les critères d'exclusion mais n'améliorait pas le lien entre la recherche et la clinique. Le projet CATALISE en 2016 a proposé le terme trouble développemental du langage qui se veut plus inclusif et qui permet de faire le pont entre la clinique et la recherche. Le terme a été approuvé par l'Ordre des orthophonistes et audiologistes du Québec (OOAQ) et par Orthophonie et Audiologie Canada. Quand le DSM-5 est sorti, même si certains chercheurs étaient opposés à l'abandon du terme « Specific Language Impairment », la majorité approuvait le changement tout en considérant que l'ouvrage n'incluait pas les éléments récents de la littérature en raison du principe de précaution (Avenet *et al.*, 2016). Le principe de précaution consiste à reconnaître ce qui est découvert ou mis en lumière à plus d'une reprise dans la littérature scientifique.

Toutefois, dans des domaines de recherche qui ont moins l'attention de la communauté scientifique, comme dans le cas du TDL, ceci peut retarder la reconnaissance d'éléments importants dans la recherche ou le traitement. Le projet CATALISE (Bishop, 2017) quant à lui semble inclure la littérature récente sur le sujet.

1.2 Motricité et langage : traitement sémantique et participation des aires motrices

1.2.1 Sémantique et fenêtres d'accès lexicales

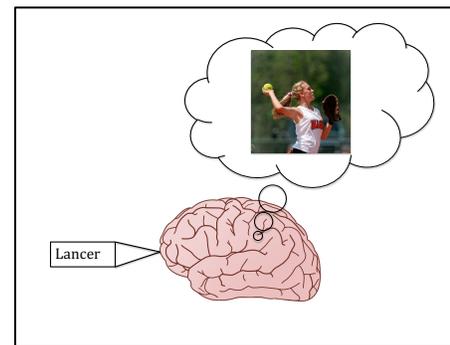
Derrière l'activation des aires cérébrales, des fonctions linguistiques et des fonctions motrices se cachent des processus cérébraux qui permettent la compréhension d'un mot (stimulus visuel ou auditif) et l'exécution d'un mouvement. Le premier processus est la sémantique. La sémantique fait partie de 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 des mots qui la constituent. La sémantique se définit plutôt comme le décodage de chacun des mots pour comprendre le sens de la phrase. Il s'agit d'un système de codes ou de symboles.

Friederici (2002) présente les phases du traitement auditif des phrases. Ce modèle a été utilisé dans l'analyse des modulations de la force de préhension qui découlent de la simulation motrice induite par le langage dont nous verrons la littérature dans les sections qui suivent. Les trois phases se découpent comme suit : la première phase, de 100 à 300 ms, est l'identification de la forme du mot et de sa catégorie. La deuxième phase, de 300 à 500 ms, est le traitement de l'information sémantique et morphosyntaxique. La troisième, de 500 à 800 ms, est le processus d'intégration et, au besoin, de réanalyse ainsi que de réparation de l'information.

1.2.2 Simulation motrice

La compréhension des mots et des phrases que nous lisons est le fruit de débats quant à la manière dont notre cerveau exécute cette tâche. D'un côté, l'approche plus traditionnelle, dite amodale, voit le traitement linguistique comme le décodage de symboles (phonologiques ou graphiques) qui sont abstraits et sans liaison avec notre environnement. L'autre approche intègre le processus de traitement linguistique à la théorie d'« Embodied

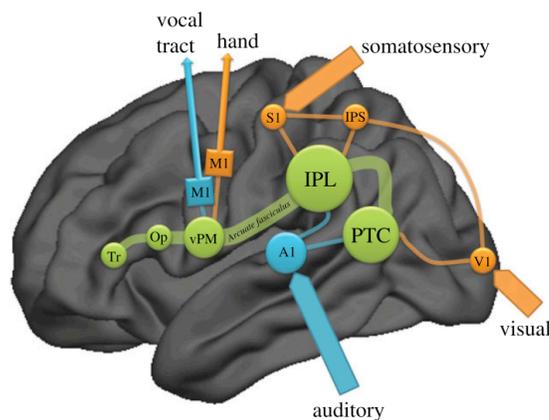
Figure 1.1 Langage et simulation motrice



cognition » (Hauk et Tschentscher, 2013), ou cognition incarnée, et s'explique par les connaissances inscrites dans le corps. Le principe est que les gestes moteurs et les mots qui les définissent sont liés à la compréhension de ceux-ci. La compréhension d'un mot d'action manuelle (« grounding language ») est liée au fait que l'action doit être incarnée avec la connaissance qu'en a le sujet (« embodied cognition ») pour devenir un substrat corporel (Glenberg, 1997 ; Hommel et al., 2001). De ce fait, le mot « lancer » est lié au schème moteur du mouvement de lancer (Figure 1.1). Ceci nous mène donc à 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 sémantique. En liant ces processus aux aires cérébrales, Ramayya et al. (2010) ont émis un trajet du décodage de l'information quant à l'utilisation d'outils où les aires de Brodmann (BA) 21 (aire auditive) et 37 envoient l'information de l'objet vers la région intrapariétale antérieure (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) alors que le deuxième donne de l'information sémantique quant à la préhension de l'objet. Le tout termine son chemin vers le lobe frontal qui comprend

l'aire BA 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 qui existe entre eux (Desai *et al.*, 2011). 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, c'est la région de la scissure intrapariétale antérieure ou aIPL qui a été localisée (Tunik *et al.*, 2007). Si les verbes et les phrases abstraites sont traités par les régions frontales, les verbes d'action vont activer aIPL même à l'intérieur d'une phrase abstraite (Dam et Desai, 2016). Ce réseau est illustré par Stout et Chaminade. (2012) dans la Figure 1.2 ci-dessous.

Figure 1.2 Réseau fronto-pariéto-temporal gauche expliquant les liens fonctionnels entre le langage et la motricité (Stout et Chaminade 2012).



Légende : IPL : lobule pariétal inférieur. IPS : sulcus intrapariétal. M1 : aire motrice primaire (mouvement de la main en orange et mouvement des organes de phonation en bleu). Op et TR : la pars opercularis et triangularis du gyrus frontal inférieur correspondant à l'aire de Broca. vPM : cortex prémoteur ventral. A1 : cortex auditif primaire. S1 : cortex somesthésique primaire. V1 cortex visuel primaire. PTC : gyrus temporal moyen postérieur.

1.2.3 Apprentissage incarné et études comportementales

Les aires cérébrales activées dans le traitement linguistique présentées dans la dernière section sont issues de différentes recherches qui ont utilisé des techniques d'imagerie (fIRM), de lecture de l'activité en continu du cerveau (EEG et EMG) et de techniques qui peuvent altérer son activité (TMS). Toutefois, des questions importantes au sujet de l'activation des aires cérébrales de la motricité pendant les traitements linguistiques sont posées par quelques auteurs et elles doivent être soulignées dans ce projet. Est-ce

que l'activation des aires motrices dans des tâches de traitement linguistique, plus particulièrement sémantique, est nécessaire à celui-ci ou est-elle un produit de l'activation simultanée lors de l'apprentissage des mots (par exemple apprendre le mot lancer alors qu'on lance une balle) ? En outre, n'est-elle pas un soutien au traitement linguistique ? Cette question s'élargit également au sujet de l'apprentissage. Est-ce que les aires motrices aident à l'apprentissage ? Des recherches comportementales ont tenté de répondre à ces questions. En voici les résultats.

En présentant des mots avant ou au début d'une action motrice qui consiste à atteindre et saisir un objet, Boulenger et al. (2006) ont démontré que le traitement linguistique dans une tâche de reconnaissance lexicale peut interférer ou faciliter l'action motrice prévue. Lorsque des verbes d'action manuels sont présentés au début de l'action motrice, ceux-ci diminuent l'accélération du poignet. Cela s'expliquerait selon les auteurs par le fait que le traitement linguistique et l'exécution de mouvements ont tous les deux besoin des mêmes ressources, soit les aires motrices. D'autre part, lorsque les verbes sont présentés avant l'action, il y a une augmentation de l'accélération du poignet, un effet facilitateur sur l'action, qui est expliqué par un amorçage des aires motrices par le traitement des mots lus qui assistent le mouvement. Les auteurs en ont conclu que, sans être essentielles, les aires motrices participeraient au traitement sémantique.

Auparavant, Glenberg et Kaschak (2002) avaient montré que le sens d'une phrase peut interférer avec une action dans un contexte spatial. Gentilucci et al. (2000) avaient démontré un effet similaire avec des adjectifs imprimés sur des objets à prendre. Dans les expériences de Glenberg et Kaschak, alors que le participant devait aller chercher un objet proche ou loin de son corps, quand le sens de la phrase incluait une dimension spatiale (transfert d'entité concrète ou de concept abstrait) contraire au référent spatial de l'objet à prendre, il y avait interférence dans le geste moteur à réaliser. Le fait que

même le sens des phrases abstraites — il n’était pas question d’objet à transférer, mais bien d’un concept abstrait telle une histoire qui est transféré vers une autre personne — interfère avec l’action constitue une démonstration que le langage est enraciné dans les expériences motrices. Les auteurs décrivent en 3 points comment ce qu’ils appellent l’hypothèse indexicale indique que le sens des mots est dans l’action. Tout d’abord, la perception des symboles est basée sur la perception du référent. Ensuite, il y a l’affordance ou la résonance motrice du symbole perçu et finalement l’affordance venant de la construction syntaxique, ce qui signifie qu’un mot ou une phrase comporte sa propre résonance motrice (ex. : Pierre accroche son manteau), mais que celle-ci peut être influencée par l’expérience de la personne (ex. : le mot « sentier » peut avoir une résonance motrice différente pour la personne qui fait de la marche en montagne contrairement à celui qui n’en fait pas). Finalement, si le langage n’était pas incarné, une phrase qui n’a pas de sens avec l’action ou une phrase qui caractérise le mouvement d’un concept abstrait n’influencerait pas nécessairement le mouvement (ex. : « accroche ton manteau sur la tasse »).

Ces deux travaux appuient la théorie de la cognition incarnée et interprètent les résultats montrant que les aires motrices participent, du moins en partie, au traitement linguistique. Le processus de traitement sémantique est une étape précoce du traitement linguistique pour lequel Boulenger et al. (2008) ont vérifié la participation des aires motrices. Ils ont présenté des mots subliminaux dans un délai trop court pour que ceux-ci soient consciemment lus et ont vérifié leur effet sur le mouvement et sur l’activité cérébrale des aires motrices. Il est ici question de l’aire motrice primaire (M1), mais aussi de l’aire motrice supplémentaire (AMS), de l’aire prémotrice et du cortex intrapariétal qui participent à la planification de l’action. Il apparaît que la présentation de verbes, même de façon subliminale, est un facilitateur à l’action comparativement à des noms. Il en est déduit que l’aire motrice contribue à la compréhension des mots d’action.

Toutefois, le langage n'implique pas seulement de lire et d'écouter. Le langage en soi représente aussi un acte moteur lorsqu'il est question de la production. Pour mieux comprendre l'intégration des aires motrices dans le réseau cérébral du langage, des chercheurs se sont intéressés à la production du langage. Nous devons contrôler des muscles dans l'objectif de produire des sons avec notre appareil vocal. Il se trouve que lorsque nous produisons des mots d'actions liés à la main, cela a aussi un effet facilitateur dans l'exécution d'un geste tel que prendre et déplacer la main. Cet effet serait le résultat de l'interaction entre la récupération sémantique des mots et la planification et la programmation de l'action (Fargier *et al.*, 2012a). Ensuite, lorsque nous communiquons, il n'y a pas que la production vocale. La majorité du temps, nous accompagnons des gestes à la parole. En observant des personnes aveugles discuter avec des personnes sans trouble visuel et d'autres personnes aveugles, il se trouve qu'ils font des gestes manuels autant dans les deux situations. Les auteurs en concluent que non seulement les gestes serviraient de soutien pour se faire comprendre par l'individu qui reçoit le message, mais ceux-ci seraient soit un reflet du processus de préparation à la parole, soit un facilitateur à ce processus (Iverson et Goldin-Meadow, 1998). Cette connexion entre les gestes et la parole est aussi documentée par Gentilucci et al. (2009) qui ont, au travers d'expérimentations comportementales et avec la TMS, émis l'hypothèse que l'observation de la préhension active autant les commandes motrices de la bouche que celles de la main quand il y a adéquation entre le mouvement de la main et le type de prise. Cela serait dû à la participation des neurones miroir (résonateur neuronal) et du processus de simulation motrice.

Ces recherches comportementales abondent dans le même sens. Les aires cérébrales qui régissent la motricité participent au traitement sémantique. Cette participation serait le fruit d'activations hébiennes dans le cadre de l'apprentissage des mots, plus particulièrement des mots d'action (verbes d'action ou nom d'outils) dans un contexte

où nous interagissons avec notre environnement (Pulvermüller *et al.*, 1999). Or, est-ce que ces aires participent vraiment à l'apprentissage ?

1.2.4 Apprentissage incarné

Au cours de ce projet, nous avons présenté des interventions cliniques en réadaptation qui se basent sur la théorie de la cognition et les liens entre la motricité et le langage. Nous ne nous intéressons pas à une clientèle adulte qui a perdu le langage préalablement normalement développé, mais à une population d'enfants dont le langage n'a pas été installé. Il est question d'aider des enfants avec des troubles de langage à apprendre de nouveaux mots ou concepts avec plus de facilité en utilisant le corps. Comme nous l'avons vu, beaucoup de recherches cherchent à déterminer comment les aires sensorimotrices participent au processus de traitement linguistique. Toutefois, peu de recherches ont tenté de comprendre comment nous apprenons selon ce concept théorique. Est-ce que les régions de la motricité participent à l'apprentissage du langage et est-ce qu'une interaction motrice (usage de geste ou de manipulation) est bénéfique à l'apprentissage ? Voici les données de la littérature à ce sujet.

Fargier *et al.* (2012b, 2014) démontrent que l'activité cérébrale chez l'adulte peut être modifiée par l'apprentissage en fonction de catégories sémantiques apprises (action et non-action). Dans le premier article, l'apprentissage des nouveaux mots d'action se fait à l'aide de l'observation de vidéos et dans la deuxième, une imitation a été ajoutée. Les mots contrôle sont des mots qui sont liés à des images de formes et couleurs variées. L'apprentissage de nouveaux mots lié à une action change l'activité du cerveau dans les régions sensorimotrices alors que l'apprentissage de mots lié à un stimulus visuel active le lobe occipital. Si chacune des aires était déjà activée en fonction du stimulus, l'apprentissage et le changement de l'activité cérébrale en fonction de la catégorie sémantique montrent que l'intégration de concepts est enracinée dans la perception et l'action. Le concept de ces travaux a été repris par Bechtold *et al.* (2018), mais cette

fois, l'apprentissage passait par la manipulation de nouveaux outils, le visionnement de l'objet et l'apprentissage de nouveaux mots par répétition vocale. L'apprentissage des nouveaux mots a été similaire entre les conditions de manipulation et d'observation. Même pour les pseudo-mots, l'apprentissage a bien fonctionné. Toutefois, les résultats intéressants concernent les ondes cérébrales mu et beta. Celles-ci sont liées à la participation des aires motrices et elles ont été renforcées à la suite de l'apprentissage avec la manipulation comparativement à l'observation. Ainsi, l'apprentissage incluant la participation du corps permettrait la participation des aires motrices lors du traitement linguistique. Cela concorde avec des résultats des travaux de Cook *et al.* (2008) sur l'apprentissage de concepts mathématiques à l'aide de gestes de la main. Dans ce projet, des enfants ont appris à résoudre des problèmes mathématiques à l'aide de stratégies de résolutions enseignées dans 3 conditions pour 3 groupes d'enfants. Le premier inclut la répétition des stratégies à l'oral. La deuxième condition inclut l'imitation de gestes manuels qui accompagnent l'explication, sans répétition de l'explication orale de la stratégie de résolution. Enfin, la troisième condition combine la réalisation des gestes et la répétition orale de la stratégie de résolution. Les trois conditions vont amener un apprentissage similaire entre les groupes, mais lorsqu'il est question de la rétention du concept mathématique qui permet la résolution de problème, les conditions avec les gestes ont permis de mieux conserver l'apprentissage. Les auteurs font l'hypothèse qu'apprendre à l'aide de gestes sollicite moins la mémoire de travail que l'apprentissage par la répétition orale seule. L'utilisation du geste permettrait d'enraciner (*grounding*) en mémoire l'apprentissage et cet enracinement se ferait à l'aide des référents spatiaux (les gestes de la main sur le tableau pour résoudre l'équation).

Jusqu'ici, nous avons vu les concepts théoriques qui sous-tendent l'enracinement et l'incarnation des processus cognitifs, plus particulièrement dans le lien qui existe entre le langage et la motricité. Certaines études nous montrent également que ce réseau ne

ferait pas que participer à l'apprentissage, mais qu'il serait un facilitateur pour la rétention des concepts assimilés.

Dans la prochaine section, nous décrirons le matériel utilisé dans ce projet sous forme de capteurs de force de préhension. Nous y verrons les normes méthodologiques utilisées dans la littérature et la contribution des différents auteurs à la compréhension des liens entre les fonctions motrices et langagières.

1.2.5 Les capteurs de la force de préhension (Grip force Sensor). Comment s'utilise cette technique ? Retour sur la littérature l'utilisant.

En 2010, Frak et al. présentent les résultats d'une expérimentation basée sur le concept de l'activation des aires motrices via la simulation motrice qui visait à aller chercher l'information sémantique des mots d'action manuelle en analysant la préhension d'un cylindre muni d'un capteur de force à l'intérieur. L'appareil avait été le sujet d'une publication concernant son utilité dans l'analyse de la force et l'orientation de la préhension (Bourbonnais *et al.*, 2008). Les résultats montrent clairement que l'écoute de mots d'action manuelle (verbe) augmente la force de préhension significativement plus que l'écoute des mots dits de non-action (noms communs, mais pas abstraits). La différence se trouvait entre 250 et 450 ms. Un élément important sur le plan technique qui ressort de cet article est qu'il est possible d'enregistrer l'influence du langage sur la motricité avec seulement un axe de la préhension, soit sur l'axe de pression horizontal, ce qui fera en sorte que les expérimentations qui suivront celle-ci utiliseront des capteurs uniaxiaux au lieu de triaxial.

Par la suite, en 2012 et 2014, Aravena et al. (2012, 2014) utilisent cette technique pour vérifier l'implication des structures motrices du cerveau en fonction du contexte linguistique. Par ailleurs, ces articles amènent des changements à la normalisation des données, ce qui permettrait de comparer les changements dans la force non seulement

entre conditions, mais aussi intra-conditions grâce à la comparaison avec la ligne de base (force pré-stimuli). Les premiers résultats (2012) démontrent que les modulations de la force de préhension augmentent comparativement à la ligne de base lors du décodage du mot d'action dans une phrase d'action (positive) et qu'elles restent neutres lors de l'écoute de phrases négatives utilisant un mot d'action ou de phrases neutres (ne décrivant pas une action). Les modulations de force sont aussi significativement supérieures lors du traitement des phrases d'action comparativement aux deux autres conditions. Les résultats de 2014 montrent que l'intention de la phrase (ex. : une phrase d'action avec un mot de non-action) influence aussi les modulations de la force de préhension, ce qui signifie que les aires motrices sont activées dans le traitement sémantique en fonction du contexte linguistique. Par ailleurs, une étude en neuro-imagerie de Dam and Desai (2016) montre l'activation des aires pariétales participant à la programmation des actions de la main à la suite de la lecture des verbes d'action, même dans une phrase n'ayant pas un contexte d'action. L'analyse plus approfondie des résultats de Aravena et al. (2012 ; 2014) qui utilisent des mots d'action intégrés à une phrase montre qu'il existe une modulation de la force préalable à l'apparition du mot d'action qui n'a pas été incluse dans le calcul statistique. Parfois, la force commence à augmenter avant ou moins de 50 ms après la présentation du stimulus alors que le traitement lexical du mot n'a pas commencé. Il est possible que des mots comme ceux désignant des outils qui ont normalement une forte résonance motrice affectent la force de préhension avant le moment cible analysé dans la phrase. Il est donc probable que la force augmente, même avant l'apparition du verbe d'action. Cela pourrait expliquer les faibles modulations dans certaines conditions jouant sur l'intention. Ceci nous amène à privilégier l'usage de mots isolés comme stimuli pour les prochaines manipulations dans les conditions uni ou bimanuelles.

Nazir et al. (2017) démontrent l'effet de la prise en continu sur la force de préhension. Sur 4 minutes, la force diminue d'un peu moins de 20 %. Des essais plus courts sont

donc recommandés. Des paramètres de filtration des données et des critères d'exclusions sont proposés. L'analyse « fast Fourier transforms » montre que peu d'informations sont présentes en bas d'une fréquence de 15 Hz. C'est donc à cette valeur que les données en continu seront filtrées dans les projets ultérieurs. L'analyse des données des participants amène la proposition qui suit pour enlever les mouvements volontaires (ex. : compter sur les doigts) et involontaires (ex. : ajustement de la force de préhension pour éviter le glissement des capteurs) qui ont des fluctuations trop importantes pour que ce soit l'effet des stimuli. Par conséquent, il est recommandé de soustraire les essais dont les modulations sont supérieures à 200 mN au-dessus ou en dessous de la ligne de base. Il est aussi recommandé de soustraire les essais dans lesquels nous retrouvons des modulations de plus de 100 mN dans un intervalle de 100 ms. Le dernier aspect proposé est l'exclusion des participants dont un nombre important de données sont rejetées. Dans l'article, il conserve les participants dont moins de 20 % des données sont exclues. Toutefois, ce chiffre est arbitraire et il a été choisi en fonction du nombre de stimuli par condition. Une expérimentation comportant plus de stimuli et donc plus de données par participant pourrait se permettre de conserver les participants avec une valeur d'exclusion supérieure sans que ces moyennes aient une faible représentativité.

Le prochain projet a exploré la différence entre la bimanualité et l'unimanualité dans les modulations de la force à la suite de l'écoute des mots d'action. Dans l'article de da Silva et al. (2018), nous trouvons des modulations significativement supérieures à la ligne de base dans les deux mains, autant en prise unimanuelle qu'en prise bimanuelle symétrique, ce qui représentait une première dans la littérature. Les résultats montrent que les modulations dans chaque main sont significativement supérieures à la ligne de base plus précocement en prise bimanuelle qu'en prise unimanuelle. De plus, la différence de temps entre la droite et la gauche est d'environ 100 ms entre les deux mains dans la prise unimanuelle alors qu'en prise bimanuelle, cet écart est de moins de

50 ms. Ces différences seraient dues à la participation de l'aire motrice supplémentaire (qui serait plus active en bimanuel (Naito *et al.*, 2016)) et possiblement à l'aire homologue droite de Broca dans le réseau du langage et de la motricité.

La participation de l'aire intrapariétale a été évoquée dans le réseau du langage et de la motricité. Elle constituerait une région clé dans le traitement de l'information sémantique des mots d'action manuelle, étant donné qu'elle sert à la planification motrice des mouvements des mains (Sakata et Taira, 1994). L'impact de la maturation de cette aire dans le développement des ponts entre les aires du langage et de la motricité est étudié dans l'article de Frak et al. (2021) à l'aide des capteurs de la force de préhension. Cette région du cerveau vit une période de changement importante entre l'âge de 11 et 13 ans, durant laquelle se produit une épuration de la matière grise et une forte myélinisation. Après 13 ans, la maturation de cette région est similaire à celle des adultes. La maturation de cette région et de ses liens fronto-pariétaux (dorsal et ventral) semble importante dans le réseau du langage et de la motricité, car les modulations de la main, à la suite de l'écoute de mots d'action, sont absentes avant 11 ans alors qu'elles sont similaires chez les adultes et les adolescents à partir de 13 ans. C'est le premier constat des résultats de Frak et al. (2021), le deuxième étant que les mots de non-action modulent aussi la force de préhension, et ce, chez les enfants comme les adolescents. Toutefois, ces modulations ne semblent pas changer en vieillissant, car il n'existe aucune différence significative entre les groupes pour cette condition et elles sont significativement inférieures à celle provoquée par le traitement sémantique des mots d'action à l'adolescence. Finalement, cette collecte de données a été réalisée avec une version portative des capteurs de force qui a été validée en comparant les résultats des adolescents canadiens présents dans l'article de Frak et al. (2021) et une cohorte d'adolescents brésiliens (Labrecque *et al.*, 2016).

Le champ d'utilisation des capteurs de force s'élargit alors que d'autres champs d'études adoptent cette technique comme Blampain et al. (2018) dont les résultats montrent que l'observation d'une action, contrairement à une condition contrôle de non-action, module la force de préhension. Cela serait dû à la simulation de l'action.

Pour terminer, l'usage des capteurs de force commence à s'étendre à d'autres champs d'études de la cognition incarnée. Récemment, des chercheurs européens ont utilisé les capteurs de force pour étudier la cognition numérique (Miklashevsky et ses collègues 2021).

1.3 Analyse de groupe vs Analyse « single-subject »

Les designs expérimentaux utilisés dans la littérature pour analyser le comportement, l'effet de traitement, les bases physiologiques d'un trouble ou d'une maladie (et bien d'autres effets, interactions et corrélations) s'appuient majoritairement sur l'analyse de groupes. Une autre approche est l'analyse « single-subject ». Malgré son nom, il ne s'agit pas de l'analyse d'un seul participant (étude de cas) mais plutôt de l'analyse des données de chaque individu dans un petit groupe. Tout comme les analyses de groupes, l'analyse « single-subject » collecte des données structurées dans des expérimentations contrôlées en utilisant des analyses quantitatives. On y analyse l'effet d'un stimulus ou d'un traitement chez chaque individu. Cette méthode de recherche est utilisée dans plusieurs champs comme la psychologie, l'éducation, les sciences de la parole et du langage et plusieurs disciplines liées à la réadaptation (Byiers *et al.*, 2012). Dans les études de groupes, les différences individuelles des effets d'un stimulus ou d'un traitement peuvent donner des résultats qui ne représentent pas le comportement ou l'effet d'un traitement sur les individus. Un exemple très simple : l'effet d'un traitement est positif dans la moitié d'un groupe et il est négatif dans l'autre moitié. Les résultats utilisant la moyenne pourraient amener l'interprétation que l'effet du traitement n'est

pas suffisant pour implanter ce traitement. Dans un autre cas, seulement 20 % des participants ne présentent pas le même comportement que le reste du groupe face à un certain stimulus dans une expérimentation. Selon l'étendue des valeurs, il est possible que l'effet soit vu comme généralisable dans la population alors qu'un participant sur cinq n'a pas le même comportement. Sans enlever de la validité aux analyses de groupes utilisées avec une rigueur statistique, l'analyse « single-subject » permet de déceler ces différences individuelles, ce qui se révèle fort important dans la recherche appliquée qui a des implications biologique et/ou sociale comme en réadaptation ou en éducation (Janosky, 2005 ; Price et al., 2015). Cette méthode est vue à la fois comme une alternative et une méthode complémentaire à l'approche de groupe (Price *et al.*, 2015).

Ensuite, l'analyse « single-subject » offre plus de flexibilité en tenant compte d'aspects particuliers d'un individu dans le groupe (comme une comorbidité). De tels résultats sont moins généralisables, mais peuvent s'avérer intéressants pour orienter de futures recherches et pour présenter les limites ou les alternatives d'un traitement ou d'une thérapie pour des cas plus complexes (multiples troubles et/ou conditions) et/ou moins fréquents.

CHAPITRE II

EXPÉRIMENTATION 1A

Dans ce chapitre, nous aborderons les bases théoriques de deux techniques d'analyse physiologique ayant une précision temporelle, les capteurs de force et l'électroencéphalogramme. Nous verrons également les résultats d'une première expérimentation jumelant ces deux techniques qui reproduira les résultats de chaque technique séparément. Cela permettra pour la première fois de présenter un lien temporel et statistique entre l'activité cérébrale et les modulations de la force de préhension. Comme mentionné précédemment, ce chapitre est basé sur l'article de Juárez et al. (2019). Ce n'est pas une traduction mot pour mot de l'article, car certains éléments ont déjà été expliqués dans le cadre théorique.

2.1 Introduction

Le lien fonctionnel entre le langage et le système moteur a représenté un sujet d'intérêt pour la neurologie depuis la première description des aires corticales des fonctions linguistiques (Broca, 1861). Dans le siècle qui a suivi, la description des syndromes cliniques découlant des lésions cérébrales a confirmé l'existence d'un transfert d'informations entre le langage et le système moteur cérébral (Geschwind, 1965 ; Liepmann, 1905). Ce sujet s'inscrit aussi au centre du débat en sciences cognitives : la

nature du sens et le format de la représentation linguistique dans l'esprit humain (Mahon et Hickok, 2016).

Les visions classiques de la cognition suggèrent que le langage humain existe dans le cerveau dans un système purement symbolique, abstrait sans relation avec les référents externes dans le monde. Dans cette vision, l'expérience sensorimotrice d'une personne avec le monde extérieur serait sans valeur à l'acquisition ou pour retrouver les mots dans leur lexique mental (Collins et Quillian, 1969 ; Fodor et Fodor, 1987 ; Kintsch, 1988 ; Newell, 1980 ; Phylyshyn, 1984). « The symbol grounding problem » offre une interprétation différente qui s'oppose à cette vision, postulant que pour être interprétable, un symbole doit être enraciné à un référent (Harnad, 1990). Si on se base sur cette compréhension, l'enracinement d'un symbole se ferait à l'aide des capacités sensorimotrices de chaque organisme, une voie directe de l'expérience avec le référent du symbole.

En lien avec cette approche, la vision de la cognition incarnée suggère que l'information sensorielle et motrice représente une partie nécessaire de l'acquisition du langage humain (Barsalou, 1999 ; Glenberg and Kaschak, 2002 ; Meteyard et al., 2012). Dans cette perspective, le message linguistique est fonctionnellement assimilé quand les gens sont engagés dans l'action (Frak *et al.*, 2010). Selon le modèle de trace expérientielle (Zwaan et Madden, 2005), c'est la co-occurrence de l'information perceptuelle et de l'action avec l'information linguistique qui génère l'acquisition du langage incarné. Du point de vue biologique, ce modèle est soutenu par la théorie Hebbienne de l'apprentissage (Hebb, 1949), qui considère que quand nous apprenons un mot par l'expérience, notre réseau linguistique et notre réseau moteur sont activés simultanément, générant un circuit partagé qui sera plus tard impliqué dans la reconnaissance sémantique.

Au cours des récentes décennies, l'émergence des méthodes d'imagerie fonctionnelle du cerveau a amené une nouvelle approche pour l'étude des liens entre le langage et la motricité dans le cerveau. Une convergence d'évidences expérimentales utilisant IRMf et tomographie par émission de positrons a révélé une activation des régions sensorimotrices du cerveau durant la compréhension du langage, surtout pour les mots reliés aux actions (pour une révision, voir Hauk et al., 2008 ; Hauk and Tschentscher, 2013). Toutefois, le manque de résolution temporelle de ces méthodes limite la détermination du stade de traitement linguistique auquel sont dues ces activations.

Les méthodes électrophysiologiques, tels que les potentiels évoqués, sont très appropriées pour une étude temporelle plus précise de la compréhension linguistique. La première évidence d'activité cérébrale, évoquée par des classes de mots spécifiques, est rapportée par Dehaene qui a trouvé une positivité dans la partie gauche inférieure du lobe frontal autour de 250 ms après le début du stimulus, celle-ci étant spécifique aux verbes d'action (Dehaene, 1995). Similairement, une équipe dirigée par Pulvermüller rapportait une augmentation de la positivité autour de 200 ms (p200) dans les électrodes frontales et centrales des potentiels évoqués à la suite des verbes, comparativement à ceux suivant les noms lors de stimuli visuels (Preissl *et al.*, 1995).

Le rôle de la p200, en tant que marqueur neuronal des classes de mots, est consistant avec le temps pour le traitement sémantique. Les premières étapes ont été retrouvées dans les 250 ms après la présentation du mot (révision Hauk et al., 2008). Selon une étude d'enregistrement intracrânien dans la région de Broca, une tâche de lecture à voix haute comprend trois pics d'activités survenant à 200, 320 et 420 ms. Ceux-ci correspondent à la récupération lexicale, au traitement syntaxique et aux changements phonologiques (Sahin *et al.*, 2009). De plus, de récentes études comportementales et de potentiel évoqué ont indiqué la récupération de l'information sémantique qui débute vers 160 ms (Mollo *et al.*, 2016).

Dans une étude suivant leur publication de 1995, Pulvermuller et al. suggèrent que la différence dans l'amplitude de la p200 reflète une « forte association motrice » évoquée par la reconnaissance des mots d'action dans le cortex frontal (moteur et prémoteur). Celle-ci est absente du traitement des mots de non-action qui implique plutôt les aires occipitales étant donné leur attribut visuel (Pulvermüller *et al.*, 1999). Toutefois, cela demeure une interprétation due au degré des corrélats électrophysiologiques, car il n'était pas directement associé à une activité motrice.

L'analyse de la force de préhension par des capteurs de force, introduits par Frak et al. en 2010, représente une technique intéressante pour confirmer la « forte association motrice » lors du traitement lexico-sémantique que refléterait l'amplitude de la p200. Par cette approche, plusieurs recherches ont amené des évidences de l'activité motrice induite par les stimuli linguistiques. En dépit de variations dans les stimuli, toutes les études confirment une plus grosse augmentation de la force de préhension quand les participants écoutent des mots d'action manuels que lorsqu'ils écoutent des mots de non-action. Dans tous les cas, cette augmentation de force est observée dans le 300 ms après la présentation des stimuli (Aravena *et al.*, 2012, 2014 ; da Silva *et al.*, 2018 ; Labrecque *et al.*, 2016 ; Nazir *et al.*, 2017).

Cette étude a donc pour but de présenter une première approche méthodologique incorporant les deux techniques, capteur de force et potentiel évoqué, dans le but de mesurer leur corrélation temporelle et/ou statistique.

2.2 Méthodologie

2.2.1 Participant

Cette expérimentation comprend 10 adultes dont l'âge moyen est de 28 ans (ES : 2,85), soit 5 femmes et 5 hommes. Tous les participants étaient droitiers, selon leurs résultats à la version francophone du test Edinburgh handedness inventory (Oldfield, 1971). Leurs résultats moyens au test étaient de 73,05 (ES : 5,29). Leur langue maternelle était le français. Les critères d'exclusion étaient la présence d'un historique de problèmes auditifs, de troubles neurologiques ou psychiatriques. Les participants ont été recrutés au sein de l'UQAM.

Ce projet a été approuvé par le Comité institutionnel d'éthique de la recherche avec des êtres humains (CIEREN) de l'UQAM.

2.2.2 Matériels d'expérimentation

2.2.2.1 Matériels physiques

2.2.2.1.1 Capteurs de force

Le capteur de force, visible aux figures 2.1 et 2.2, est uniaxial, un choix fait selon les résultats de Frak et al. (2010). Il est composé de deux rondelles d'aluminium de 5 cm de diamètre vissées à lui, ce qui lui donne 1,8 cm d'épaisseur. Le capteur peut supporter

Figure 2.1 : Capteur de force



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

Figure 2.2 : Matériel portatif



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 le canal droit du fil audio qui envoie un signal sonore servant de « trigger » venant de l'ordinateur. Les stimuli sonores venant de l'ordinateur passent par le canal gauche du même fil vers l'amplificateur de son, une console de son HENYX802 de Behringer, ce qui permet de contrôler le volume sortant des écouteurs du participant. La carte d'acquisition est finalement connectée à un ordinateur utilisant un système d'exploitation de Microsoft.

2.2.2.1.2 Électroencéphalogramme

Un casque de référence internationale Biosemi à 64 électrodes a été utilisé dans ce projet (Figure 2.3). L'amplificateur activeTwo Biosemi avait un taux d'échantillonnage de 2048hz et une bande passante entre 0,01 et 70 Hz. L'impédance des électrodes était maintenue en dessous de 5 KOhms. Les électrodes étaient connectées au casque en utilisant une colonne de gel conducteur pour remplir l'espace entre la peau et l'électrode. Les données étaient envoyées sur un ordinateur utilisant un système d'exploitation de Microsoft.

Figure 2.3 : Casque Biosemi



2.2.2.2 Matériel numérique

2.2.2.2.1 Stimuli

Les stimuli auditifs sont des mots d'action (A) et de non-action (NA). Les mots d'action sont tous des verbes d'action manuelle et les mots de non-action sont des noms n'ayant peu ou pas de sémantique liée à une action manuelle (Annexe A) (New *et al.*, 2001). Le temps moyen des 70 mots est de 684 ms avec un écart-type de 98 ms et il n'y a

aucune différence entre les mots A et NA dans les valeurs contrôlées. Celles-ci sont la fréquence, le nombre de syllabes, la fréquence bi et trigramme et le pitch (Frak et al., 2010, 2021 ; Labrecque et al., 2016). Dix listes de mots ont été faites. Pour chacun des mots (A : Frapper, Jeter, Montrer, Prendre et Serrer ; NA : Avion, Chambre, Étoile, Sentier et Terrain), une liste a été faite dans laquelle il est le mot cible. Le mot cible était mélangé avec les 15 noms et 15 verbes ne commençant pas par le même phonème. Le mot cible se répétait entre 10 et 12 fois, ce qui donnait des listes entre 40 et 42 mots avec une seconde de silence entre chaque mot, pour une durée d'environ 75 secondes. La durée des listes suit les recommandations de Nazir et al. (2017). L'ordre des mots sur 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.

Chaque bloc d'écoute durant l'expérimentation utilisait une liste de mots différents qui avaient été programmés dans le logiciel E-Prime 2.0.3. Lors de l'expérimentation, le logiciel envoyait un signal au début du mot (trigger) au logiciel Biosemi ActiveView qui recevait aussi les données de l'électroencéphalogramme. Pour les capteurs de force, le trigger était dans les fichiers sonores utilisés par E-prime. Le signal était présent dans l'un des canaux du son stéréo qui était envoyé vers la carte d'acquisition des capteurs de force. Le mot entendu par le participant était dans l'autre canal qui était distribué dans les deux écouteurs du casque d'écoute.

2.2.3 Protocole

Avant l'expérimentation, le participant doit remplir le formulaire de préférence manuelle avec l'expérimentateur et répondre aux questions pour remplir la fiche du participant qui regroupe des informations comme l'âge, le genre, la langue maternelle, la langue de travail et la langue en contexte social du participant (Appendice A).

Ensuite, le participant s'installe dans la chambre d'expérimentation qui est insonorisée, les lumières sont tamisées et cette dernière est isolée pour bloquer les interférences électromagnétiques. Dans la chambre, il y a une chaise, une table et le matériel d'expérimentation (carte d'acquisition de l'EEG et le kit portatif des capteurs de force). Le participant s'assoit sur la chaise et appuie ses avant-bras sur un tapis de mousse placé sur la table (pour le confort du participant). Un casque Biosemi de 64 électrodes est installé sur la tête du participant après la mesure de sa circonférence crânienne. Puis, l'espace entre la peau et l'électrode est comblé avec le gel conducteur. Le casque d'écoute est installé et un test de son permet de vérifier que le participant entend et comprend les stimuli auditifs (mots). Le participant est informé du mot cible avant le début de chaque bloc d'expérimentation. Par la suite, ce dernier prend dans chaque main les capteurs de force en pince tridigitale (pouce, index et majeur). Les avant-bras et le 5^e métacarpe de chaque main sont appuyés sur le tapis de mousse. Quant aux capteurs de force, ils ne touchent pas le tapis de mousse durant les blocs d'expérimentation. Avant de démarrer un bloc d'expérimentation, le participant doit appliquer une force de 1,5 N à l'aide des consignes de l'expérimentateur. Il lui est demandé de maintenir cette pression durant l'écoute des stimuli. Lorsque le participant est informé du mot à compter et que la force de sa prise est contrôlée, l'expérimentateur lui donne pour consigne de fermer les yeux (pour éviter toute distraction visuelle durant l'écoute des mots) et celui-ci commence à entendre la liste de mots. Une fois la liste de mots récitée, le participant peut déposer les capteurs de force et indiquer à l'expérimentateur le nombre de fois qu'il a entendu le mot cible. Ainsi, le premier bloc d'expérimentation est terminé. Nous répétons la procédure avec d'autres listes de mots pour un total de 10 blocs d'écoute. Entre 1 et 2 min de repos sont accordées aux participants entre chaque bloc.

2.2.4 Traitement des données

2.2.4.1 Électroencéphalogramme

Premièrement, à l'aide du logiciel EEGLab, version 13.4.4b (Delorme et Makeig, 2004), les données sont filtrées à 1 Hz high pass comme fréquence plancher. Deuxièmement, les données sont compressées à 500 Hz. Troisièmement, les canaux défectueux sont détectés avec la fonction « Automatic channel rejection » de EEGLab. Quatrièmement, les canaux avec des valeurs qui s'éloignent de la distribution Gausienne prédéterminée à 5 % sont rejetés. Cinquièmement, ces canaux sont interpolés avec les canaux d'électrodes avoisinants. Sixièmement, nous avons référencé à la moyenne virtuelle en incluant les 64 canaux, mais en excluant les canaux faciaux. Par la suite, les epochs sont divisés en segments de 2000 ms de -500 à 1500 ms autour du temps zéro (début du stimulus). Finalement, une correction par la ligne de base est effectuée en utilisant les 200 ms précédant le début de chaque stimulus. Pour corriger les artéfacts potentiels, les epochs avec un seuil d'amplitude 50 μ V sont rejetés. Le pourcentage de rejet varie entre 4 et 18 %.

2.2.4.2 Capteurs de force

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 paramètres suivants : 15 Hz with fourth zero, low pass butter worth filter et notch filter 50 Hz. L'extraction des données est de 300 ms avant le stimulus linguistique et 1000 ms après.

Les données sont enregistrées en format ASCII pour être par la suite transformées en XLS. Les données par participant seront compilées dans le logiciel Excel de Microsoft. Ensuite, les données seront normalisées par la ligne de base dans le logiciel SPSS d'IBM (V.24). Entre -200 et 800 ms, les séquences normalisées dans lesquelles les MF dépassent 200 mN au-dessus ou au-dessous de la ligne de base ou qui présenteront des

modulations de plus de 100 mN à l'intérieur de 100 ms ont été exclues (Nazir *et al.*, 2017). Ces grandes ou rapides MF ont été associées à des mouvements de doigts qui peuvent être présents lors d'une phase de réajustement de la prise de l'objet ou simplement lorsque le participant compte sur ce doigt en exerçant ainsi une pression sur le capteur. Lorsque plus de 30 % des séquences de données sont exclues, le participant sera exclu de l'analyse statistique. Sur 10 participants retenus pour cette expérimentation, un seul participant a été exclu (N=9).

2.2.5 Analyse des données

2.2.5.1 Électroencéphalogramme

Une grande moyenne est faite pour chaque participant dans chaque condition pour toutes les électrodes. Les conditions sont les mots d'action en cible, de non-action en cible, d'action en non-cible et de non-action en non-cible. Une analyse statistique préliminaire des potentiels évoqués est conduite par le logiciel EEGLab pour toutes les électrodes entre -200 et 1100 ms afin de localiser les effets significatifs (test paramétrique, $p < 0,05$ avec une correction FDR). Après la localisation des régions d'intérêts et des fenêtres de temps significatives, nous avons extrait l'amplitude (voltage moyen) et le pic (voltage maximum). Ensuite, les différences d'amplitudes ont été évaluées avec une distribution t de student dans le logiciel IBM Statistical logiciel.

2.2.5.2 Capteurs de force

Les analyses statistiques ont été faites entre 100 et 800 ms en se basant sur 3 étapes du traitement linguistique qui sont le traitement lexical (100 à 300 ms), le traitement sémantique et morphosyntaxique (300 à 500 ms) et l'intégration/réanalyse/réparation de l'information (500 à 800 ms) (Friederici, 2002). Toutefois, pour obtenir la précision suffisante nous permettant d'établir des liens temporels avec les résultats attendus avec l'électroencéphalogramme, nous avons réduit les fenêtres d'analyse à 50 ms. Cela

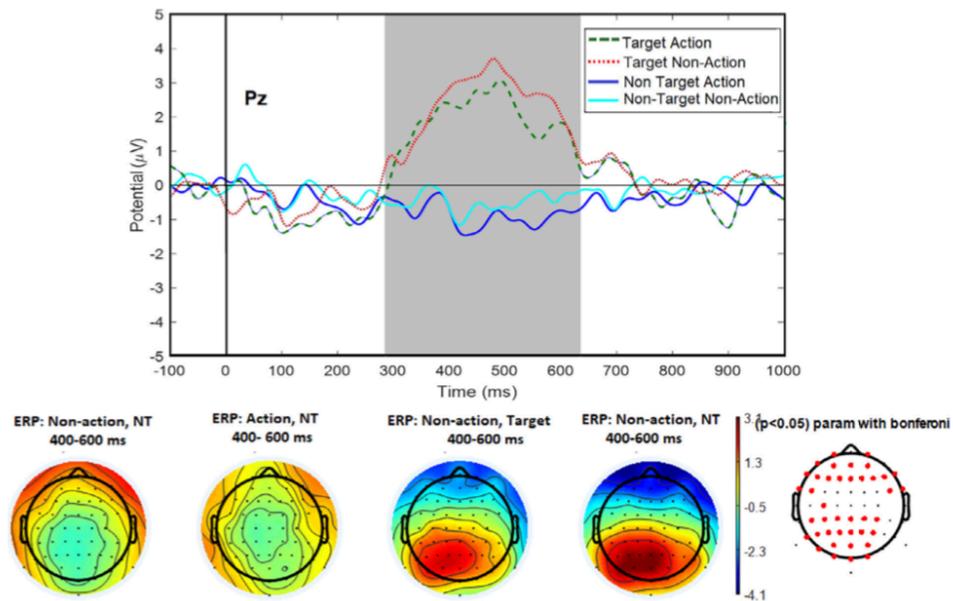
donne 14 fenêtres de temps. Cette méthode a été utilisée dans les travaux de da Silva et al. (2018). Ensuite, une comparaison des modulations de la force de chacune des conditions à sa ligne de base, soit la force préstimuli, est réalisée pour déterminer le moment où la force de préhension est significativement modulée par nos stimuli. Une fois que les fenêtres de temps, qui sont significativement plus fortes que la ligne de base ont été identifiées, des test-t appariés sont menés entre les conditions séparément pour chaque main. Les conditions sont l'écoute de mots d'action et de mots de non-action en mots cibles.

2.3 Résultats

2.3.1 Effets cible, p300 pariétal

Nous avons observé une différence significative entre la condition cible et non cible dans un groupe d'électrodes pariétal (P1, Pz, P2, CP1, CPz, CP2, P3 et P4) dont la différence était plus grande à Pz. La fenêtre de temps qui présentait la plus grande positivité significative selon les tests-t appariés se situait entre 400 et 600 ms, ce qui correspond à la latence et la localisation de la composante p3b qui est significative pour les conditions A (diff. des moy. = 3,5822, $t(8)=6,431$, $p < 0,01$, $d= 3,266$) et NA (diff. des moy. = 3,3362, $t(8)=6,413$, $p < 0,01$, $d= 2,754$). Nous ne trouvons pas de différence significative lorsque nous comparons action et non-action en cible ($t(8)=2,022$, $p = 0,078$, $d= 0,6795$). Nous pouvons voir la différence entre les conditions cibles et non cibles dans la figure 2.4. Étant donné que la composante p3b constitue un indicateur de l'engagement du réseau attentionnel (Polich, 2007), sa présence confirme que nos participants étaient bien attentifs lors de l'écoute des mots cibles.

Figure 2.5 : L'effet cible p3b (image extraite de l'article Juárez et al. (2019)).

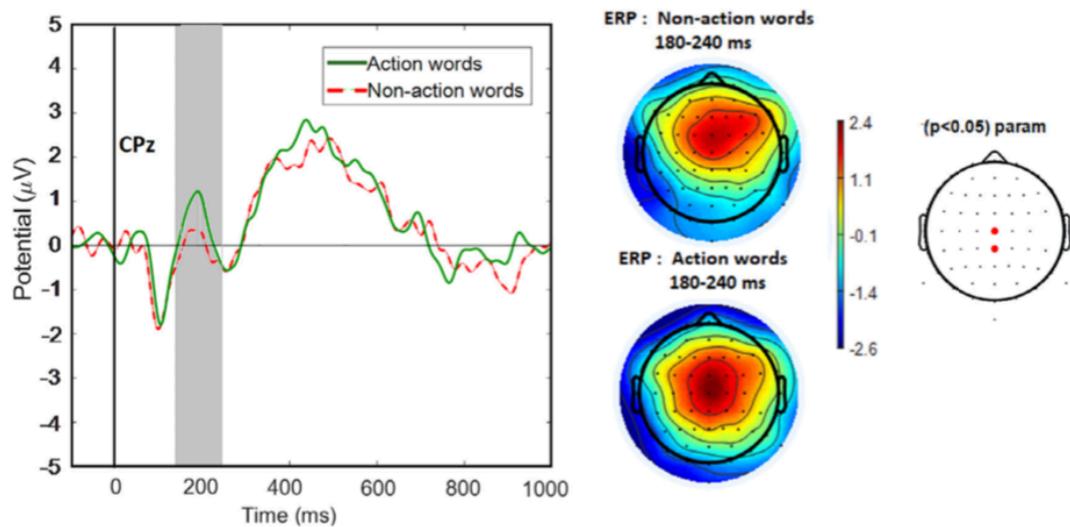


En haut : Nous pouvons observer une plus grande amplitude pour les mots cibles (action et non-action) que les mots non cibles (action et non-action) à l'électrode Pz. En bas : Nous pouvons observer la cartographie de l'activité cérébrale entre 400 et 600 ms (période de la p3b) pour les mots cibles et non cibles ainsi que les électrodes dont les potentiels évoqués sont significativement différents, particulièrement dans les électrodes de la région pariétale.

2.3.2 Effets p200 central

Nous avons entrepris l'exploration des possibles différences significatives entre action et non-action dans la condition cible en faisant les tracés des 64 électrodes. Pour ce faire, nous avons commencé par extraire les données dans la ligne médiane d'électrode (Fz, Cz, CPz, Pz et Oz) pour déterminer la fenêtre de temps des potentiels évoqués et les régions d'intérêts. Nous pouvons voir les résultats dans la fenêtre de temps 160 à 240 ms à la figure 2.5.

Figure 2.6 Composante p200 CPz (image extraite de l'article Juárez et al. (2019).



À gauche : Nous pouvons observer une plus grande amplitude pour les mots d'action (en vert) que pour les mots de non-action (en rouge pointillé) à l'électrode CPz dans la fenêtre de temps de la p200. À droite : Nous pouvons observer la cartographie de l'activité cérébrale entre 180 et 240 ms pour les mots d'action et de non-action ainsi que les électrodes dont les potentiels évoqués sont significativement différents (CPz et Cz).

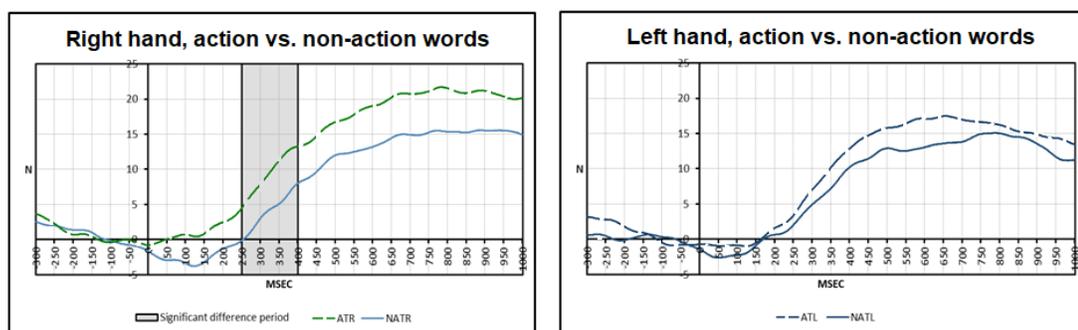
Tableau 2.1 Valeurs descriptives de l'amplitude dans les électrodes d'intérêts (Cz, CPz et C3 pour la p200 et regroupement pariétal pour la p300).

Électrode	Action en Cible			Non-Action en Cible			Action Non-Cible			Non-Action Non-Cible		
	Moy.	E-T	IC	Moy.	E-T	IC	Moy.	E-T	IC	Moy.	E-T	IC
Cz (180-220 ms)	1,40344	1,65313	1,08002	1,02974	1,52325	0,99517	1,76503	1,05934	0,69209	1,88257	1,184	0,774177
CPz (180-220 ms)	0,66626	1,28459	0,86546	0,05827	1,16838	0,76534	0,73572	0,91944	0,43567	0,56491	0,86003	0,3456
C3 (180-220 ms)	1,10017	1,24402	0,59135	1,60358	1,10346	0,52454	1,94705	1,06451	0,50602	1,75168	1,0117	0,48094
Pariétal (400-600 ms)	2,49813	1,92707	0,91605	2,48185	2,14968	1,02187	-0,4759	1,12466	0,53461	-0,4415	0,8996	0,42768

2.3.3 Modulation la force de préhension

À l'écoute des mots d'action, les modulations de la force de chaque main commencent à être significativement supérieures à la ligne de base à partir de 250 ms jusqu'à 800 ms (main droite : moy = 6,287, $t(8) = 3,544$, $P < 0,01$; main gauche : moy = 5,283, $t(8) = 2,646$, $p < 0,05$). Pendant l'écoute des mots de non-action, les modulations de la force deviennent significativement supérieures à la ligne de base un peu plus tard, soit de 350 ms à 800 ms (main droite : moy = 6,570, $t(8) = 2,911$, $p < 0,05$; main gauche : moy. = 8,814, $t(8) = 2,983$, $p < 0,05$). La description complète de l'analyse statistique comparative à la ligne de base se trouve au tableau 2.2 qui inclut les moyennes, l'écart-type, les intervalles de confiance et la taille de l'effet. Ensuite, en ce qui concerne l'analyse interconditions, nous avons constaté une différence significative entre les mots d'action et les mots de non-action dans la fenêtre de temps de 250 ms à 400 ms (diff. des moy. 0,005441, $t(8) = -2,634$, $P = 0,030$, $d = -0,9779$) pour la main droite seulement. Il est possible de voir dans la figure 2.6 les modulations plus fortes de la force de préhension à la suite de l'écoute des mots d'actions, comparativement à la suite des mots de non-actions. L'ensemble des résultats des analyses interconditions figurent au tableau 2.3

Figure 2.7 Graphiques comparatifs des modulations de la force de préhension pour chaque main (image extraite de l'article Juárez et al. (2019)).



Légende : Ligne pleine : MF induite par les mots de non-action; Ligne pointillé : MF induite par les mots d'action; Zone grise : fenêtre de temps dont les MF sont significativement différentes entre les conditions.

Tableau 2.2 Résultats de l'analyse comparative des modulations de la force de préhension à la ligne de base par condition pour les mots cibles.

Conditions		Fenêtre de temps													
		100 150ms	150 200ms	200 250ms	250 300ms	300 350ms	350 400ms	400 450ms	450 500ms	500 550ms	550 600ms	600 650ms	650 700ms	700 750ms	750 800ms
NAMG	Moy.	-1,796	0,855	1,090	3,561	6,069	8,814	10,940	12,299	12,677	12,766	13,372	13,706	14,392	15,027
	E-T	3,958	4,664	5,995	7,073	8,044	8,864	10,197	11,060	11,940	12,462	13,021	13,144	14,370	15,786
	IC	2,586	3,047	3,917	4,621	5,255	5,791	6,662	7,226	7,801	8,142	8,507	8,587	9,388	10,313
	t(8)=	-1,361	0,055	0,545	1,511	2,264	2,983*	3,218*	3,336*	3,185*	3,073*	3,081*	3,128*	3,005*	2,856*
	d=	0,45	0,02	0,18	0,50	0,76	0,99	1,07	1,11	1,06	1,02	1,03	1,04	1,00	0,95
NAMD	Moy.	-3,600	-2,153	-0,786	1,308	4,224	6,570	8,773	10,971	12,255	12,838	13,772	14,866	14,951	15,432
	E-T	3,705	4,720	5,468	5,436	6,038	6,772	8,811	9,351	11,483	12,161	11,467	11,395	11,363	11,285
	CI	2,421	3,084	3,572	3,551	3,945	4,424	5,756	6,109	7,502	7,945	7,492	7,445	7,424	7,373
	T(8)=	-	-1,369	-0,431	0,722	2,099	2,911*	2,987*	3,52**	3,202*	3,167*	3,603*	3,914*	3,947*	4,103*
	d=	0,97	0,46	0,14	0,24	0,70	0,97	1,00	1,17	1,07	1,06	1,20	1,31	1,32	1,37
AMG	Moy.	-0,874	0,556	2,322	5,283	8,667	11,641	13,940	15,351	16,008	16,917	17,219	17,272	16,753	16,441
	E-T	3,734	5,071	5,106	5,990	6,250	6,936	7,709	8,818	9,418	9,988	10,017	9,522	9,677	9,218
	IC	2,440	3,313	3,336	3,913	4,083	4,531	5,036	5,761	6,153	6,525	6,544	6,221	6,322	6,022
	T(8)=	-0,702	0,329	1,364	2,646*	4,112*	5,035*	5,425*	5,223*	5,099*	5,081*	5,157*	5,442*	5,193*	5,351*
	d=	0,23	0,11	0,46	0,88	1,37	1,68	1,81	1,74	1,70	1,69	1,72	1,81	1,73	1,78
AMD	Moy.	0,564	1,790	3,246	6,287	9,594	12,543	13,803	15,915	17,168	18,545	19,502	20,681	20,844	21,526
	E-T	3,306	4,534	5,229	5,322	6,403	6,523	6,875	7,428	7,567	6,833	6,672	6,736	6,563	6,110
	IC	2,160	2,962	3,416	3,477	4,183	4,262	4,492	4,853	4,944	4,464	4,359	4,401	4,288	3,992
	T(8)=	0,512	1,184	1,862	3,544*	4,495*	5,769*	6,023*	6,428*	6,806*	8,142*	8,768*	9,211*	9,528*	10,57*
	d=	0,17	0,40	0,62	1,18	1,50	1,92	2,01	2,14	2,27	2,71	2,92	3,07	3,18	3,52

Légende : IC = intervalle de confiance ; d = taille d'effet de Cohen ; * = Valeur de p < 0.05 ; ** = valeur de P < 0.01 ; *** = valeur de p < 0.001 ; NAMG = Non-Action Main Gauche ; NAMD = Non-Action Main Droite ; AMG = Action Main Gauche ; AMD = Action Main droite.

Tableau 2.3 Résultats de l'analyse des différences interconditions des modulations de la force de préhension pour les mots cibles.

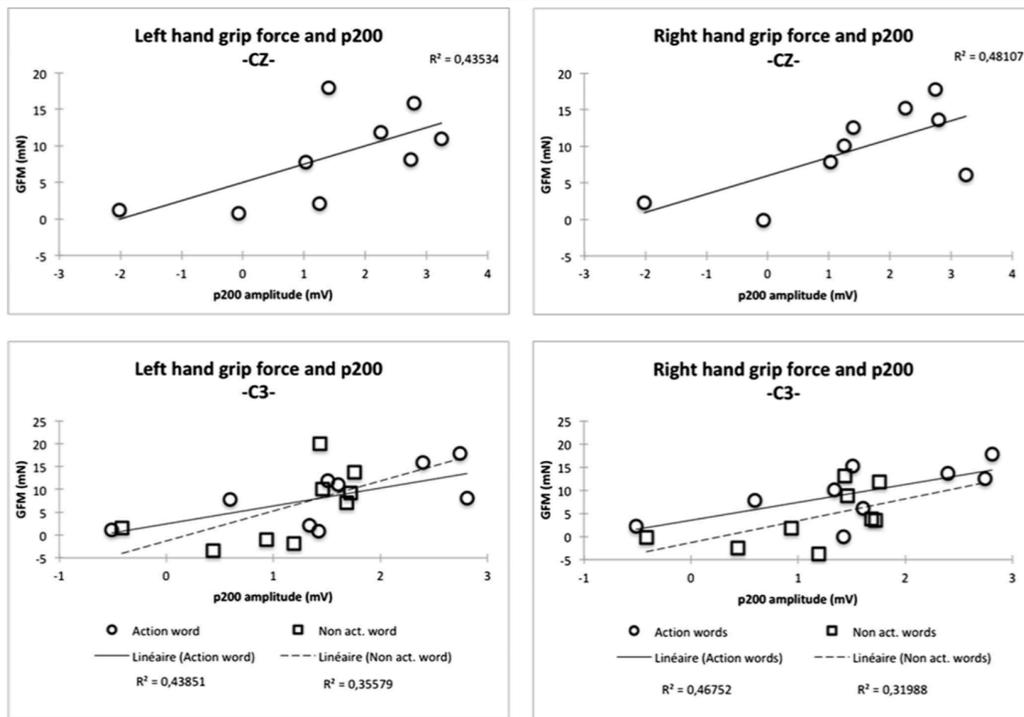
Comparaison		Fenêtre de temps										
		250-300ms	300-350ms	350-400ms	400-450ms	450-500ms	500-550ms	550-600ms	600-650ms	650-700ms	700-750ms	750-800ms
AMD x AMG	T(8)=	0,665	0,538	0,47	-0,065	0,235	0,459	0,662	0,821	1,224	1,38	1,647
	d=	0,22	0,18	0,16	0,02	0,08	0,15	0,22	0,27	0,41	0,46	0,55
NAMD x NAMG	T(8)=	N/A	N/A	-2,034	-1,712	-0,788	-0,214	0,028	0,147	0,419	0,182	0,107
	d=	N/A	N/A	0,68	0,57	0,26	0,07	0,01	0,05	0,14	0,06	0,04
NAMG x AMG	T(8)=	-0,7	-1,029	-1,203	-1,132	-1,187	-1,144	-1,325	-1,24	-1,084	-0,596	-0,306
	d=	0,23	0,34	0,40	0,38	0,40	0,38	0,44	0,41	0,36	0,20	0,10
NAMD x AMD	T(8)=	-2,386*	-2,495*	-2,932*	-1,922	-1,832	-1,567	-1,892	-2,216	-1,939	-1,900	-1,798
	d=	0,80	0,83	0,98	0,64	0,61	0,52	0,63	0,74	0,65	0,63	0,60

Légende : IC = intervalle de confiance ; d = taille d'effet de Cohen ; * = Valeur de p < 0.05 ; **= valeur de P < 0.01 ; ***= valeur de p < 0.001 ; NAMG = Non-Action Main Gauche ; NAMD = Non-Action Main Droite ; AMG = Action Main Gauche ; AMD= Action Main droite.

2.3.4 Corrélations entre la p200 et la modulation de la force.

Une fois que nous avons obtenu les corrélats électrophysiologiques et les changements dans les modulations de la force de préhension, nous avons réalisé une série de corrélations linéaires entre l'amplitude de la force et l'amplitude de la p200 dans les électrodes Cz, CPz, C3 et C4 dans les fenêtres de temps que nous avons déjà identifiées dans les résultats de chacune des techniques. Pour ce faire, nous avons utilisé le coefficient de corrélation de Spearman considérant la taille de notre échantillon et le fait que les variables électrophysiologiques pour les mots de non-action n'avaient pas une distribution normale selon le test de normalité Shapiro-Wilk. Nous avons remarqué des corrélations significatives entre la p200 et les modulations de la force de préhension entre 250 ms et 400 ms pour les mots d'actions dans Cz, CPz et C3, ainsi que pour les mots de non-action en C3 seulement (voir la figure 2.7).

Figure 2.8 Nuages de points illustrant la distribution des données pour chaque corrélation. (image extraite de l'article Juárez et al. (2019)).



Légende : Au-dessus : corrélation entre p200 dans l'électrode Cz et les MF à la suite du traitement des mots d'action. Les corrélations étaient significatives pour les mots d'action à la fois dans la main droite ($\rho = 0,717$, $p < 0,030$) et la main gauche ($\rho = 0,583$, $p < 0,099$). Au-dessous : Corrélation entre p200 dans l'électrode C3 et les MF suscité par les mots d'action (significatives pour les deux mains, gauches ($\rho = 0,700$, $p < 0,036$) et mains droite ($\rho = 0,667$, $p < 0,050$)) et les mots de non-action (Significatives pour la main gauche ($\rho = 0,667$, $p < 0,050$), mais pas pour la droite ($\rho = 0,650$, $p < 0,058$)).

En résumé, nos résultats confirment deux effets induits par le langage : une plus forte amplitude de la p200 et des augmentations plus importantes de la force de préhension pour les mots d'actions comparativement aux mots de non-action. Ceux-ci sont connectés par des corrélations statistiques et par un lien temporel entre les deux mesures qui jusqu'à maintenant étaient décrites séparément.

2.4 Discussion

Comme mentionné dans l'introduction, une série d'études récentes en neuro-imagerie ont observé des activations sensorimotrices liées aux traitements des mots. Toutefois, comme souligné par Hauk dans une récente révision de la littérature, ces études manquent de précision temporelle, qui s'avère essentielle pour comprendre si ces activations peuvent être classifiées sémantiques (Hauk, 2016). Notre étude offre une nouvelle méthodologie qui intègre deux parties de l'évidence temporelle (potentiel évoqué et mesure de la force de préhension en direct) qui soutient cette idée et qui explore aussi le lien entre ces deux derniers.

Pendant l'analyse des potentiels évoqués par nos stimuli auditifs, nous avons observé l'effet p200 déjà décrit par plusieurs auteurs utilisant des mots isolés comme stimuli. Cet effet représente une plus grande positivité de la p200 par les mots d'action comparativement aux mots de non-action (Kellenbach et al., 2002 ; Pulvermüller et al., 1999 ; Xia et al., 2016 ; Zhang et al., 2003). Nous avons aussi remarqué un effet classique, la p3b, une amplitude plus grande de la p3b que l'on observe pour un mot cible (Polich, 2007). La composante p3b est générée dans l'aire pariétale et elle est liée au traitement de l'évaluation volontaire des stimuli. Nous interprétons l'effet de la p3b comme une confirmation de l'allocation des ressources attentionnelles sur les stimuli présentés. Ceci est important, car l'attention est connue pour augmenter l'efficacité du traitement dans l'imagerie mentale (Fazekas et Nanay, 2017).

Un atout additionnel de cette étude expérimentale est la confirmation des résultats précédemment rapportée pour les modulations plus fortes de la force de préhension entre 250 et 400 ms après avoir écouté les mots d'action pour les deux mains, mais de façon plus importante dans la main droite (dominant chez nos participants) (da Silva *et al.*, 2018). Une découverte intéressante, mais un peu controversée, est que les mots de

non-action induisent aussi des modulations de force qui sont significativement différentes de la ligne de base. Quand l'augmentation de la force de préhension induite par les mots d'action est plus proéminente (en matière d'apparition plus précoce, d'une durée plus longue et d'une plus grande amplitude), il est tout de même important de reconnaître l'augmentation de force induite par les mots de non-action. Pour interpréter cette découverte, nous proposons deux explications possibles. La première vient de la vision que tous les mots, peu importe la classe de mots, amènent une simulation et ainsi un certain degré d'activation de l'aire motrice primaire (M1). Cette hypothèse est soutenue par les résultats rapportés par Dreyer and Pulvermüller (2018) qui ont observé l'implication des aires motrices dans le traitement des noms abstraits. Si les noms abstraits, qui sont considérés comme un exemple de mots sans sens incarné, peuvent activer les aires motrices, les mots concrets, qui réfèrent à des entités dans le monde avec lesquelles les humains interagissent d'une façon motrice (Greeno, 1994), peuvent sûrement induire une activation liée à l'affordance de chaque objet ou entité. Une explication alternative serait que l'augmentation de force dans le cas des mots de non-action correspondrait à un processus cognitif additionnel qui se produit durant l'expérimentation. Une méta-analyse a réuni les évidences de l'implication de l'aire motrice primaire dans différentes fonctions cognitives comprenant la mémoire de travail qui est requise dans cette tâche (compter les stimuli cibles) (Tomasino et Gremese, 2016). Toutefois, cette hypothèse ne comprend pas le résultat suivant : l'augmentation significativement plus forte pour les mots d'action et l'augmentation de la force à la suite des mots d'action qui devient significativement différente de la ligne de base 100 ms avant les mots de non-action.

Dans tous les cas, les stimuli linguistiques étaient capables d'induire des activations motrices involontaires qui vont dans le sens de la théorie de la cognition incarnée du sens des mots. La p200 qui est reconnue comme un marqueur neuronal des classes de mots, sensible au changement des propriétés sémantiques des mots et au déroulement

des événements, est aussi cohérente avec les évidences de l'apparition plus précoce de la récupération sémantique. Théoriquement, la source de cette composante est constituée par les neurones du cortex prémoteur ; ainsi, la plus grande p200 est observée pour les mots d'action suivant le recrutement additionnel des neurones prémoteur (Hauk et al., 2004 ; Pulvermüller et al., 1999). À notre connaissance, c'est la première fois qu'est répliquée la signature verbale de la p200 pendant que les participants réalisent une tâche motrice (préhension des deux capteurs). C'est aussi la première fois que les corrélats électrophysiologiques du traitement des mots sont corrélés à une mesure périphérique de l'activité motrice. La littérature existante a étudié ces deux types de mesures séparément jusqu'à maintenant.

Nos résultats s'intègrent dans un modèle temporel du déroulement de l'information considérant que le temps entre les cortex primaires et les muscles de la main est d'environ 18 à 20 ms (Rossi et al., 1998). Le lien entre la p200 et l'augmentation de la force de préhension, suggéré par leurs apparitions consécutives dans les deux mesures, est confirmé par la corrélation statistique entre l'amplitude de la p200 et la force de préhension entre 250 et 400 ms. Nous reconnaissons que notre échantillon est petit, ce qui limite l'interprétation des différences et des corrélations, et qu'une étude disposant d'un échantillon plus grand s'avère nécessaire pour corroborer les liens entre les corrélats électrophysiologiques et les modulations de la force de préhension.

Cette étude fournit une première base méthodologique pour intégrer la p200 et les modulations de la force de préhension par le traitement linguistique dans le même cadre théorique, suggérant l'influence linguistique d'un circuit de résonance motrice dans le cerveau, originellement décrit dans le contexte d'observation d'actions et d'objets (Grèzes et al., 2003 ; Rizzolatti et Craighero, 2004). Dans ce cadre théorique, la p200 suscitée par nos stimuli linguistiques peut être tracée, au moins en partie, aux aires motrice et prémotrice (Pulvermüller *et al.*, 1999) et provoque une augmentation

involontaire de la force (arrivant 10-20 ms après la fenêtre de la p200) représentant une inhibition incomplète de l'activation du cortex moteur primaire pendant le traitement linguistique (Jeannerod, 1994). Nous esquissons une potentielle source neuroanatomique pour cette inhibition descendante, le sulcus intrapariétal (SIP), une région connue pour son implication dans le contrôle de la préhension (Begliomini *et al.*, 2014, 2018) et l'imagerie motrice (Wheaton *et al.*, 2004). Quand nous entendons un mot, le langage induit une activité dans le gyrus postérieur supérieur temporal (l'aire de Wernicke) qui envoie un signal au SIP déjà engagé dans la tâche de préhension. Le SIP pourrait réduire le signal d'inhibition au cortex prémoteur qui, quand il est activé par le signal linguistique, pourrait à son tour activer M1 et envoyer un message excitateur aux muscles de la main par la voie pyramidale (Binder *et al.*, 2009). Cette explication neuroanatomique n'est pas nécessairement limitée à ce qu'on appelle un mot « d'action ». De récentes études menées avec des capteurs de force ont conclu que l'augmentation de la force de préhension induite par le langage n'est pas confinée qu'aux verbes d'action de la main, mais concerne aussi les noms. De récents résultats IRMf montrent l'activation des régions motrice et prémotrice par des noms concrets et abstraits (Pulvermüller, 2018). Cela suggère que dans notre étude, le circuit de résonance motrice est activé par les mots d'action et de non-action. Sous ces concepts, notre étude apporte des évidences qui soutiennent les liens fonctionnels entre le système linguistique et le système moteur dans le cerveau.

2.5 Conclusion

Les résultats de nos recherches démontrent le lien entre les deux corrélats physiologiques du langage, qui jusqu'à maintenant étaient rapportés séparément, la p200 et les modulations de la force de préhension. Si cela est confirmé par des recherches ultérieures avec des échantillons plus larges, le lien temporel entre le début de l'augmentation de la force de préhension (ultérieur à 250ms) et la corrélation avec

l'amplitude de la p200 amène la preuve que ce phénomène moteur fait partie de la reconnaissance sémantique, plus spécifiquement d'une activation motrice involontaire résultant d'une simulation d'action induite par le langage. Nous croyons que les résultats de ce travail préparatoire s'avèrent prometteurs pour considérer la combinaison des potentiels évoqués et des capteurs de force comme une approche enrichissante dans l'étude de l'activité motrice induite par le langage, générant de la valeur et de l'intérêt à l'hypothèse sur l'écoulement de l'information dans le temps.

CHAPITRE III

EXPÉRIMENTATION 1B

Dans ce chapitre, nous examinerons les résultats d'une première analyse « single-subject » avec les capteurs de force dans le but de déterminer s'il est possible de vérifier la présence du lien entre la motricité et le langage chez les individus. Un indicateur de la présence de ce lien nous permettra ultérieurement de vérifier s'il est présent chez les personnes ayant un trouble neurodéveloppemental.

3.1 Introduction

La cognition incarnée et son influence sur la représentation et le traitement sémantique ne sont plus une théorie à prouver ; c'est plutôt un concept dont il faut comprendre les applications, les ramifications et les limites dans la cognition et l'apprentissage (Hauk et Tschentscher, 2013 ; Meteyard et al., 2012). L'une des limites qui pourrait exister est la possibilité que des individus avec des troubles neurodéveloppementaux ne puissent pas ou éprouvent de la difficulté à apprendre selon les concepts de la cognition incarnée. Toutefois, le sujet est peu documenté. On trouve davantage de recherches sur la cognition incarnée s'intéressant aux maladies dégénératives que neurodéveloppementales. Les personnes ayant des troubles neurodéveloppementaux ont des aires et/ou des réseaux cérébraux altérés qui affectent des apprentissages spécifiques (ex. : dyscalculie et dysorthographe) et d'autres qui affectent plusieurs

sphères d'apprentissage de façon directe et indirecte (ex. : dysphasie, dyspraxie, autisme...) (Billard et al., 1996 ; de Guibert et al., 2011 ; Hommet et al., 2003 ; Krishnan et al., 2016 ; Ullman et al., 2020). Si étudier la cognition incarnée dans ces populations nous en apprend plus sur le sujet, nous devons aussi nous poser la question : est-il possible pour ces populations de faire des apprentissages incarnés ? Dans ce projet de doctorat, la population ayant un trouble développemental du langage est celle qui nous intéresse. Comme présenté dans l'introduction, cette population est hétérogène. Il devient alors impératif de pouvoir analyser la présence des liens entre le réseau langagier et le réseau moteur pour chaque individu. Cela permettrait de répondre à la question posée par Hauk and Tschentscher (2013) dans leur conclusion : est-ce qu'il y a des individus plus incarnés que d'autres ?

C'est ainsi qu'une approche de recherche « single-subject » semble plus appropriée qu'une approche de recherche par groupe, car les données de chaque participant seront analysées séparément. Ce type de recherche permet plus de flexibilité, tout en gardant une méthodologie rigoureuse. Un autre avantage est que tous les participants dont les données sont valides seront inclus dans l'étude, contrairement à la pratique courante dans les analyses en groupe de rejeter les données considérées comme aberrantes. Ceci est particulièrement important dans une population hétérogène comme pour le trouble développemental du langage, car si les données se séparaient en 2 ou 3 profils, créer des groupes a posteriori sans critère fixe, comme nous ferons dans ce projet, serait plus à risque de subjectivité sans analyse individuelle rigoureuse.

En utilisant les capteurs de force dans un modèle « single-subject » pour examiner les liens entre le langage et la motricité, il sera possible de voir si la force de préhension module dans toutes les conditions (action/non-action, main droite et gauche) chez tous nos participants, comme nous le constatons dans les études utilisant des analyses de groupes (Frak *et al.*, 2010, 2021 ; Juárez *et al.*, 2019 ; Nazir *et al.*, 2017). De plus, la

méthodologie peut rester semblable à celle des analyses de groupes. Dans des études « single-subject » sur les potentiels évoqués utilisant la normalisation des données par une ligne de base préstimulus, comme pour les capteurs de force, cette technique est considérée comme fiable comparativement à d'autres types d'analyses utilisées pour détecter la composante N400 chez les participants (expression du contenu sémantique) (Kallionpää et al., 2019). Si cette technique avec l'EEG est utilisée à l'échelle de groupe et à celle de l'individu, il nous semble que nous pourrions appliquer cette technique d'analyse chez l'individu avec les capteurs de force.

Toutefois, en tant que premier projet de recherche utilisant ce design expérimental avec des capteurs de force, il faut disposer d'un groupe contrôle dans lequel nous analyserons les liens entre le langage et la motricité chez chacun des participants. Dans le chapitre 4, nous vous présenterons l'analyse « single-subject » d'un groupe d'adolescents ayant un trouble développemental du langage dont la collecte a été interrompue par la pandémie de COVID-19. Il a donc été impossible avec les fermetures des écoles, et par la suite avec les règles sanitaires, d'effectuer une collecte de données avec un groupe contrôle similaire au groupe d'adolescents ayant un TDL.

Dans les articles de Frak et al. (2021) et de Labrecque et al. (2016), les adolescents montrent une réponse motrice aux stimuli linguistiques similaires à celle des adultes que nous avons vue dans les articles de (Frak *et al.*, 2010 ; Juárez *et al.*, 2019 ; Nazir *et al.*, 2017). Les mots d'action et de non-action font moduler la force positivement à la suite de leur écoute dans les deux populations et nous observons une différence significative entre les modulations de la force à la suite de ces deux stimuli. Les résultats similaires entre les deux groupes semblent suffisants pour émettre l'hypothèse que les résultats des individus adolescents et adultes devraient être semblables. Nous utiliserons donc les données des participants de l'expérimentation 1A et 4 autres participants qui avaient été exclus de cette expérimentation en raison de données

invalides pour l'électroencéphalogramme. Le protocole pour les expérimentations avec les capteurs de force étant quasiment identique avec celui du groupe d'adolescents ayant un TDL, il sera possible de comparer les résultats des deux groupes.

En se fiant à la littérature explorant les liens entre la motricité et le langage des populations adultes et adolescentes analysées en groupe, notre hypothèse est que nous trouverons des résultats similaires chez les participants adultes analysés individuellement. Toutefois, ce type d'analyse pourrait faire ressortir l'une des faiblesses des analyses de groupes, c'est-à-dire la possibilité qu'une minorité d'individus soit différente du groupe et que le lien entre la motricité et le langage soit plus faible ou absent chez eux, ce qui n'a pas été un sujet documenté jusqu'à maintenant.

3.2 Méthodologie

La méthodologie est identique à l'expérience 1A pour le matériel physique et numérique, pour le protocole et pour le traitement des données. Donc, je vous réfère aux pages 32 à 38 pour réviser cette section au besoin. Nous nous intéressons seulement aux données des capteurs de force. Dans les prochaines sections, nous expliquerons les différences avec l'expérience 1A concernant les participants et nous présenterons l'analyse « single-subject » utilisée pour la première fois avec des capteurs de force.

3.2.1 Participants

Cette expérimentation comprend 14 adultes dont l'âge moyen est de 27 ans (ES : 1,51), soit 5 femmes et 9 hommes. Selon leurs résultats à la version francophone du test Edinburgh handedness inventory (Oldfield, 1971) 13 participants étaient droitiers alors qu'un seul était gaucher (moy. : 70, ES : 10,54). Leur langue maternelle était le français.

Les critères d'exclusion étaient la présence d'un historique de problèmes auditifs, de troubles neurologiques ou psychiatriques. Les participants ont été recrutés au sein de l'UQAM. 10 des 14 participants ont fait partie de l'expérimentation 1A. Les 4 autres ont fait la même expérimentation, mais n'ont pas été retenus, car les données étaient invalides pour l'électroencéphalogramme. Ils font partie de ce projet, car seules les données des capteurs de force nous intéressent.

3.2.2 Analyses statistiques

Ce projet utilisant l'approche « single-subject », les analyses statistiques sont effectuées pour chaque participant. Étant donné que cela fait beaucoup d'analyses statistiques, pour diminuer la possibilité d'erreurs de type I, les données sont moyennées par les fenêtres de Friederici (2002) contrairement à l'expérience 1A. En premier, nous avons fait une ANOVA à 1 facteur à mesure répétée, soit la latence pour voir si les modulations changent dans le temps à la suite de l'écoute du stimulus. Il y a 4 mesures : préstimulus, 100 à 300 ms, 300 à 500 ms et 500 à 800. Lorsque l'ANOVA est significative, un post hoc LSD (least significant difference) est réalisé pour vérifier si la force de préhension des 3 fenêtres poststimuli est significativement différente à celles préstimuli. Cette analyse est faite pour les modulations de chaque main, à la suite de l'écoute des deux stimuli, les mots d'action et les mots de non-action. Il peut donc y avoir jusqu'à 4 ANOVAS par participant.

La deuxième analyse est une ANOVA à 2 facteurs, le facteur fixe est le stimulus (mots d'action/mots de non-action) et le facteur dépendant est la latence qui est à mesure répétée (300 ms à 500ms et 500 ms à 800ms) pour comparer les modulations de la force à la suite des différents stimuli. En fonction des résultats de la première analyse, nous avons exclu la première fenêtre de Friederici, car il est rare que la force soit significativement différente de la ligne de base entre 100 et 300 ms dans la première analyse. Cette méthode est similaire à celle de l'article de Juárez et al. (2019).

L'ANOVA est effectuée deux fois par participant, pour la main gauche et pour la main droite.

3.3 Résultats

Dans cette section, pour faciliter la lecture des résultats, les tableaux serviront à résumer des résultats des différentes analyses statistiques. D'abord, nous verrons les résultats des analyses par condition pour chaque participant. Ensuite, nous verrons les résultats des analyses interconditions par participant. Il est à noter que pour la première analyse, la sphéricité a été analysée et lorsque celle-ci a été violée, la correction Greenhouse-Geiser a été utilisée pour corriger les résultats. Si la valeur de Greenhouse-Geiser est supérieure à 0,750, c'est la correction Huynh-Feldt qui est utilisée. Les résultats complets de toutes les analyses, y compris celle de la sphéricité qui n'est pas présentée dans cette section, sont en tableau dans l'annexe B.

Tableau 3.1 : Sommaire des résultats des ANOVAS intraconditions par participant du changement de la modulation de la force dans le temps. Résultats complets en Annexe B tableau 4.7.

Participant	Main droite Mot d'action	Main droite Mot de non-action	Main gauche Mot d'action	Main gauche Mot de non-action
1	Cond. rejetée	Cond. rejetée	Cond. rejetée	Sig.
2	Sig.	Sig.	Sig.	Non-sig.
3	Sig.	Non-sig.	Sig.	Non-sig.
4	Sig.	Non-sig.	Sig.	Sig.
5	Cond. rejetée	Cond. rejetée	Sig.	Sig.
6	Sig.	Sig.	Sig.	Sig.
7	Sig.	Sig.	Sig.	Sig.
8	Sig.	Sig.	Sig.	Sig.
9	Sig.	Sig.	Sig.	Sig.
10	Sig.	Sig.	Sig.	Sig.
11	Cond. rejetée	Sig.	Cond. rejetée	Cond. rejetée
12	Sig.	Sig.	Non-sig.	Sig.
13	Sig.	Non-sig.	Cond. rejetée	Sig.
14	Sig.	Sig.	Sig.	Non-sig.
Totaux	11 sig.	9 sig. 3 non-sig.	10 sig. 1 non-sig.	10 sig. 3 non-sig.

Légende : Sig. : l'ANOVA significatif ; Non-sig : l'ANOVA est n'est pas significative ; Cond. rejetée : la condition est rejetée, car plus de 25 % des données sont exclus.

Dans le tableau 3-1, nous pouvons voir pour chacun des participants lesquelles des conditions modulent la force de préhension de façon importante entre les 4 fenêtres retenues (préstimulus/100-300 ms/300-500ms/500-800ms). Nous avons pu observer qu'à la suite de l'écoute des mots de non-action, la force de préhension n'était pas significativement différente entre les fenêtres de temps pour 3 participants (sur 12 pour la droite et sur 13 pour la gauche). À la suite de l'écoute des mots d'action, les modulations de la force de préhension étaient significativement différentes dans le temps pour tous les participants dans la main droite et pour 10 des 11 participants dans la main gauche. Maintenant, examinons les résultats du post hoc LSD pour identifier quand les modulations sont significativement supérieures à la ligne de base (préstimuli).

Tableau 3.2 : Sommaire des résultats du post hoc LSD entre les modulations préstimuli et poststimuli. Résultats complets en Annexe B, tableau 4.8.

Participant	Main droite Mot d'action	Main droite Mot de non-action	Main gauche Mot d'action	Main gauche Mot de non-action
1	-	-	-	2-3
2	2-3	1*	3	A. Non-sig.
3	1-2-3	A. Non-sig.	2-3	A. Non-sig.
4	3	A. Non-sig.	3	3
5	-	-	1-2-3	2
6	1-2-3	2-3	2-3	1-2-3
7	2-3	2-3	2-3	2-3
8	2-3	2-3	3	3
9	2-3	2-3	1-2-3	2-3
10	2-3	2-3	2-3	1-2-3
11	-	2-3	-	-
12	3	3	A. Non-sig.	2-3
13	2-3	A. Non-sig.	-	1-2-3
14	3	3	2-3	A. Non-sig.
Nb. Part. Mod. positives	11/11	8/12	10/11	10/13
Nb. Part. Mod. négatives	0/11	1/12	0/11	0/13
Nb. Part. Mod. Neutre	0/11	3/12	1/11	3/13

Légende : 1 : Significatif supérieur à la ligne de base entre 100 et 300 ms ; 2 : idem entre 300 et 500 ms ; 3 : idem entre 500 et 800 ms ; A Non-sig : l'ANOVA est n'est pas significative ; - : condition rejetée ; * significativement inférieur à la ligne de base.

Cette analyse nous permet de voir les participants dont les modulations sont significativement différentes de la ligne de base par condition. Il est important de noter que le dénominateur des totaux inclut les participants dont la condition était valide, mais dont l'ANOVA n'était pas significative. Il a été conçu ainsi pour identifier tous les participants dans chaque condition qui ont et qui n'ont pas de modulation de la force à la suite de l'écoute des stimuli.

Nous pouvons voir que pour quasiment tous les participants dont l'ANOVA était significative, la force de préhension est significativement supérieure à la ligne de base. Le résultat est clair à la 3^e fenêtre. Les deux exceptions sont : les modulations de force de la main droite du participant 2 à la suite de l'écoute des mots de non-actions sont significativement inférieures à la ligne de base et ensuite, elles sont considérées comme neutres, car elles ne sont pas significativement différentes de la ligne de base. Toujours à la suite des mots de non-actions, les modulations de force dans la main gauche du participant 5 sont significativement supérieures dans la fenêtre 2 (300 à 500 ms), mais contrairement aux autres participants comme lui, la différence n'est plus significative après 500 ms.

En résumé, tous les participants dont la main droite a été analysée présentent des modulations plus fortes que la ligne de base 500 ms après l'écoute de mots d'action. Pour le même stimulus, le résultat est quasiment identique pour la main gauche avec 10 participants sur 11. À la suite de l'écoute des mots de non-action, nous constatons cette différence dans la modulation de la force chez la majorité des participants, mais pas en totalité (8/12 pour la main droite et 9/13 pour la main gauche). Le prochain tableau nous présente les résultats de l'analyse des différences entre les modulations de force à la suite des mots d'action et de non-action chez les participants dont les deux conditions sont valides.

Tableau 3.3 : Sommaire des résultats des ANOVAS interconditions par participant.
 Résultats complets en Annexe B tableau 4.9

Participants	Main	Effets et Interaction des variables		
		Latence	Mot	Latence/Mot
2	Gauche	Oui	Non	Non
	Droite	Oui	Oui	Non
3	Gauche	Non	Oui	Non
	Droite	Non	Oui	Non
4	Gauche	Oui	Non	Oui
	Droite	Oui	Non	Non
5	Gauche	Non	Non	Non
6	Gauche	Oui	Non	Non
	Droite	Oui	Non	Non
7	Gauche	Oui	Non	Non
	Droite	Oui	Non	Non
8	Gauche	Oui	Non	Non
	Droite	Oui	Non	Oui
9	Gauche	Non	Non	Non
	Droite	Oui	Non	Non
10	Gauche	Non	Non	Non
	Droite	Non	Non	Non
12	Gauche	Non	Non	Non
	Droite	Oui	Non	Non
13	Droite	Non	Non	Non
14	Gauche	Oui	Non	Non
	Droite	Oui	Non	Non
Totaux	Gauche	5	1	1
	Droite	8	2	1

Le premier effet qui est analysé dans l'ANOVA est la latence, soit les différences de modulations dans le temps. On peut voir que l'effet est significatif pour 8 participants sur 11 pour la main droite et 5 sur 11 pour la main gauche. Ensuite, l'effet des mots (action/non-action) n'est significatif que pour 1 participant pour ses deux mains et 1 autre que pour la droite. Finalement, l'interaction entre ses deux effets n'est significative que pour 2 participants pour une de leurs mains, mais le post hoc LSD trouve une différence action/non-action seulement dans un cas.

3.4 Discussion

Le premier constat est que la première analyse single subject avec des capteurs de force ne reproduit pas les résultats des recherches en groupes concernant la différence des modulations de la force entre les conditions action et non-action. À l'exception de trois participants, nous ne remarquons pas de différence significative entre les modulations de la force à la suite des mots d'action et de non-action. Toutefois, une observation des données nous montre qu'il y a une explication mathématique et que cela ne contredit pas les analyses de groupes faites avec les capteurs de force dans la littérature. Le deuxième constat est que les résultats concernant la comparaison des modulations avec la ligne de base reproduisent en général les résultats de la littérature, mais avec plus de nuances entre l'effet des mots d'action et de ceux de non-action sur la force de préhension. Les modulations de la force à la suite de l'écoute des mots de non-action ne sont pas supérieures à la ligne de base chez tous nos participants alors que la littérature retrouvait un effet sur les modulations de la force qui était supérieur à la ligne de base lors de l'analyse de groupes. Le dernier élément qui ressort des données est que l'effet de l'écoute des mots d'actions sur les modulations de la force est homogène dans le groupe et ceci pourrait constituer un indicateur pour comparer des populations dont le lien motricité/langage serait à évaluer, comme pour notre population d'adolescents

ayant un trouble développemental du langage. Élaborons chacun des points présentés ci-dessus.

3.4.1 La comparaison directe de l'effet de mots d'action et de non-action dans les analyses individuelles versus celles de groupes.

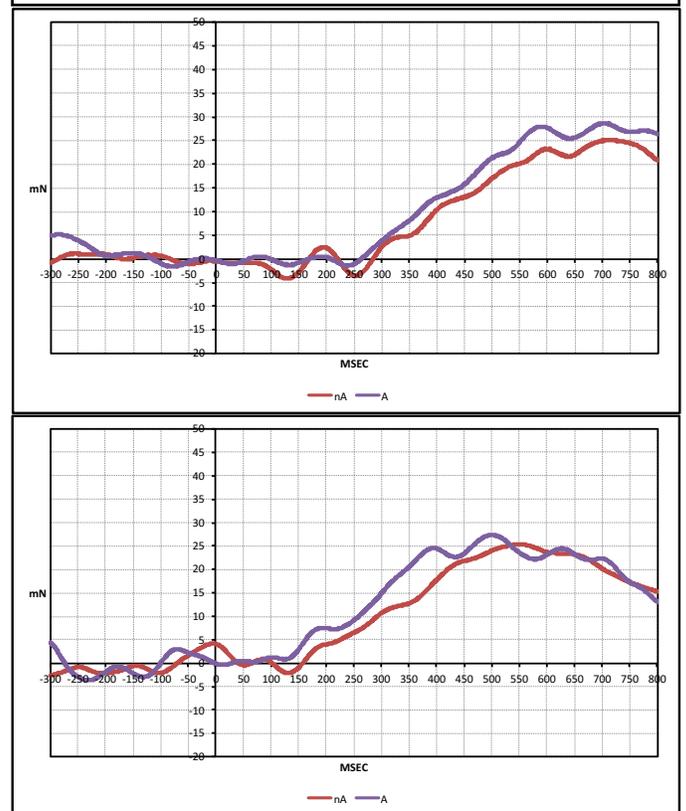
Notre analyse de la différence entre les modulations suivant les mots d'action et les mots de non-action chez chaque participant ne reproduit pas les résultats des analyses de groupes des articles suivants : Juárez et al. (2019) (expérimentation 1A) et Frak et al. (2010) chez les adultes, Frak et al. (2021) chez les adolescents ainsi que Nazir et al. (2017) chez l'adulte dont le mot cible est dans une phrase au lieu de mots isolés comme stimuli. Toutefois, le fait de ne pas retrouver cette différence chez la majorité des individus dans cette étude ne remet pas en question les résultats antérieurs ou l'intérêt de l'analyse « single-subject ». L'explication de la présence de cette différence lors d'analyses de groupes et de l'absence de cette différence lorsqu'on analyse les individus semble s'expliquer mathématiquement.

Il est fréquent, comme dans la méthodologie avec les capteurs de force, que les données des individus subissent un lissage en utilisant la moyenne de leurs données pour effectuer une analyse de groupes. Ainsi, pour faciliter l'analyse statistique, les données sont moyennées par condition pour chacun des participants. S'il est possible de vérifier la variabilité entre les participants, nous avons perdu la variabilité chez chacun des participants. Une étude de Fisher et al. (2018) a analysé 6 études à mesure répétée pour vérifier la variance intra et interindividus. Leur résultat est que la variance des individus est 2 à 4 fois plus forte que la variance des groupes. Ceci pourrait expliquer pourquoi nous ne voyons pas la différence action/non-action à l'échelle individuelle. Une variabilité plus importante, même pour seulement une condition (mais qui est probablement pour les deux conditions dans notre cas), pourrait faire en sorte que les

tests statistiques ne voient pas de différence entre les conditions. Mais pourquoi l'effet est-il visible en groupe ?

La diminution de la variabilité lors d'analyses de groupes pourrait rendre les deux effets plus distinctifs et donc, il est plus possible que le test statistique les considère comme différents. Ensuite, comme il est possible de le voir chez nos participants, les moyennes des modulations de force à la suite des mots d'actions sont, dans la plupart des cas, supérieures à celles suivant les mots de non-actions (Figure 3.1), mais pas significativement supérieures. Cependant, en prenant toutes les moyennes des participants, qui sont majoritairement supérieures pour la condition des mots d'action, l'écart entre la condition des mots d'actions et celle des mots de non-action répétée par plusieurs participants devient une différence qu'il est possible de distinguer statistiquement dans un groupe comme dans l'expérience 1A.

Figure 3.1 Graphiques des modulations de la force de la main droite des participants 7 (au-dessus) et 10 (en dessous).



Si on revient sur l'article de Fisher et al. (2018), on peut constater qu'il avance dans sa conclusion qu'il faut faire attention à la généralisation des données de groupes dans le traitement des individus, car des effets en groupes ne sont pas nécessairement reproductifs chez les individus. N'entrant pas dans le débat de cet ouvrage, j'abonde

toutefois dans le sens de la réponse de Adolf et Fried (2019) à cet article qui mentionnent qu'il est possible de généraliser même si la variabilité des individus est supérieure à celle des groupes, mais il faut aussi s'ouvrir aux avancées de la technologie mobile qui nous permettent d'obtenir plus de données sur les individus. Leur réponse semble s'accorder à celle de Price et al. (2015) pour qui les analyses de groupes et les analyses « single-subject » sont complémentaires.

Il semble donc tout à fait normal que nous ne retrouvions pas la différence action/non-action lorsque nous les comparons directement. Comme expliqué par Dreyer et Pulvermüller (2018), il est plus juste de ne pas se limiter à la comparaison directe entre les activations cérébrales dues aux mots abstraits et celles dues aux mots concrets d'action pour tirer les conclusions concernant la participation de M1 au traitement des deux classes de mots. C'est plutôt en analysant les patrons d'activation de chacune des conditions et en vérifiant les aires qui sont partagées dans le traitement des différentes classes de mots qu'ils ont trouvé des activations de M1 pour des mots abstraits, tels que les mots représentant des émotions. C'est dans cette idée que nous avons effectué les analyses comparatives que nous venons de présenter et aussi des analyses spécifiques à chaque catégorie de mots en les comparant à leur propre ligne de base. Ainsi, il sera possible de voir les différences et les similarités dans le traitement des mots d'action et de non-action sur les modulations de la force.

3.4.2 La comparaison avec la ligne de base, un possible indicateur de la présence des liens entre la motricité et le langage.

Entre les différentes conditions (action/non-action, main droite/main gauche), le résultat qui retient le plus l'attention est celui dans la main droite à la suite de l'écoute des mots d'action. Comme on peut le voir dans le tableau 3.4 à la page suivante, tous

les participants dont la condition était valide ont des modulations de la force supérieures à la ligne de base.

Dans la main gauche, le résultat est quasiment identique.

Toutefois, pour un participant, ces modulations sont considérées comme neutres comme on peut le voir dans la figure 3.2 (ligne verte). Les analyses et les informations sur le participant dont nous disposons ne nous donnent aucun indice sur la raison des résultats différents des

autres conditions et des autres participants pour la même condition.

Figure 3.2 Graphique des MF du Participant 11.

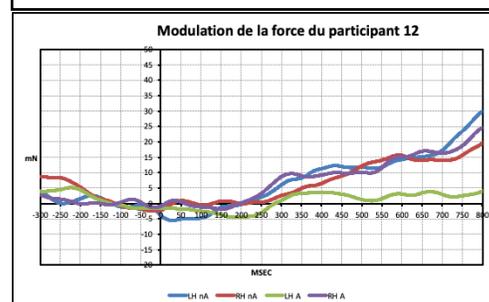
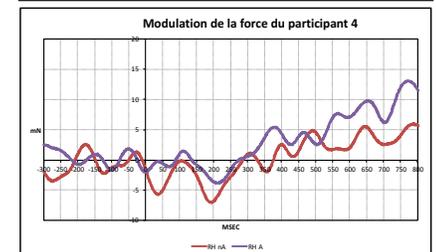


Tableau 3.4 Dénombrement des participants dont les modulations sont supérieures à la ligne de base.

Conditions	Main gauche non-Action	Main droite non-Action	Main gauche Action	Main droite Action
Nombre de participants dont la modulation de la force était supérieure à la ligne de base.	10	8	10	11
Nombre de participants dont la condition était valide.	13	12	11	11
Pourcentage de positivité.	77 %	66,6 %	91 %	100 %

Maintenant, regardons les résultats des conditions avec les mots de non-actions. Le quart et le tiers des participants ont des modulations que l'on peut considérer comme neutres (77 % main gauche/66 % main droite). Ce sont les participants 2, 3, 4 et 13 pour la main droite et 2, 3 et 14 pour la main gauche. À l'exception du participant 3 pour les deux mains et 14 pour la gauche, la moyenne des modulations de la force des autres participants était supérieure à la ligne de base sans être significative. Ceci montre la plus grande variabilité dans des modulations à la suite de l'écoute des mots de non-action comparativement à la suite des mots d'action. Le participant 4 (figure 3.3) en est un bon exemple. La différence entre les moyennes des modulations à la suite des conditions d'action et de non-action dans la main droite n'est pas grande, comme on peut le voir, et les conditions ne sont pas significativement différentes. Pourtant, seules les modulations à la suite des mots d'action sont supérieures à la ligne de base. Ceci indique un effet plus homogène des mots d'action sur les modulations de la force de la main que l'on peut aussi observer dans le tableau 3.5 à la page suivante, en comparant les écarts-types par main entre les conditions. Dans la main droite, environ les deux tiers des données retenues pour les analyses ont des écarts-types plus petits pour la condition de mots d'action comparativement à la condition non-action. Cette homogénéité (intra et interparticipants) et les modulations légèrement plus fortes (non significatives) dues aux traitements des mots d'action s'accordent avec l'activation du réseau motricité et langage qui inclut la région intrapariétale (imagerie, planification des actions de la main), des régions prémotrices (planification et contrôle moteur) et possiblement M1.

Figure 3.3 Graphique des MF
Participation 4 (main droite)



L'une des questions concernant l'effet du traitement sémantique des mots de non-action sur les modulations de la force est la suivante : pourquoi n'est-elle pas similaire chez tous nos participants ? La majorité des participants ont des modulations de la force

de préhension supérieures à la ligne de base dans la condition de non-action. L'explication qui semble la plus plausible est que l'affordance de chaque individu pour les mots cibles soit différente, ce qui se traduirait par plus ou moins de modulations selon le mot et le participant. En fonction de nos expériences, ces mots peuvent s'être ancrés avec plus ou moins de liaison motrice. Par exemple, pour une personne qui s'adonne à de la randonnée périodiquement, le mot sentier peut avoir des liens moteurs plus forts que pour une personne qui n'en fait pas ou qu'une personne qui en fait occasionnellement. Même le mot requin peut avoir une affordance différente. Une personne dont la perception des requins se base sur l'univers cinématographique hollywoodien voit le requin comme un danger, une source de stress qui peut occasionner des tensions dans les muscles, possiblement dans les mains. À l'opposé, pour d'autres, c'est un animal qui n'est pas un danger si on vit loin de la mer. Il y a donc moins d'associations motrices. Bien sûr, cela reste hypothétique, mais s'inclut dans le concept Hébbien de l'apprentissage et l'ancrage des mots dans le corps de la théorie de la cognition incarnée. Si le concept d'affordance a été retenu comme explication par Frak et al. (2021) pour interpréter les modulations de la force à la suite de l'écoute des mots de non-action, le concept explique aussi l'absence de modulations chez certains participants avec nos mots sélectionnés.

Tableau 3.5 Valeurs d'écart-type des participants par fenêtre de temps.

Conditions	DA			DnA			GA			GnA		
Fenêtres	100-300 ms	300-500 ms	500-800 ms	100-300 ms	300-500 ms	500-800 ms	100-300 ms	300-500 ms	500-800 ms	100-300 ms	300-500 ms	500-800 ms
1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	41,77	43,8	50,29
2	25,6	34,48	41,16	20,35	30	41,18	29,6	45,31	54,5	27,1	39,11	46,26
3	18,14	26,92	32,72	23,24	36,29	42,89	24,03	29,7	33,78	19,02	22,18	24,52
4	16,75	22,15	24,35	17,63	20,31	23,65	18,09	23,94	29,33	13,95	18,35	19,82
5	-	-	-	-	-	-	35,23	47,7	58,6	30,88	31,14	46,43
6	18,83	22,63	25,74	21,98	31	39,03	23,55	29,3	34,61	25,56	36,14	38,7
7	28,17	35,62	39,08	20,31	27,75	35,47	17,56	27,74	30,93	24,15	32,15	39,39
8	39,26	38,37	38,18	30,66	39,04	39,53	27,64	29,87	27,82	26,19	30,21	25,26
9	28,09	37,05	41,62	30,94	37,27	41,86	28,44	42,32	39,06	32,3	38,97	37,31
10	26,99	32,04	35,08	32,41	40,16	42,95	20,62	21,05	22,59	22,97	30,35	35,62
11	-	-	-	28,27	35,82	47,8	-	-	-	-	-	-
12	23,82	36,04	32,85	25	31,4	44,51	18,84	24,23	32,38	23,34	26,75	36,18
13	32,45	41,82	50,31	24,29	33,99	42,83	-	-	-	32,91	43,39	47,15
14	17,09	17,34	21,45	17,92	20,02	20,07	6,96	8,57	11,29	11,23	13,07	19,41

Légendes : DA : Main Droite mots d'action ; DnA : Main Droite mots de non-action ;
GA : Main Gauche mots d'action ; GnA : Main Gauche mots de non-action

3.5 Conclusion

Nos résultats n'ont donc pas reproduit ceux de la littérature quant à la comparaison directe entre les conditions, mots d'action et mots de non-action. Or, cela semble normal, car la variabilité des individus est plus grande que celle d'un groupe. Ensuite, l'analyse de chacune des conditions nous a permis de voir que la modulation de la force à la suite de l'écoute des mots d'action donne des résultats homogènes dans notre groupe, plus particulièrement dans la main droite, ce qui n'est pas le cas des mots de non-action, bien que la majorité du groupe ait des résultats positifs. Ce résultat sera retenu comme un indicateur pour comparer une population TDL qui est plus hétérogène et dont la littérature, jusqu'à maintenant, ne semble pas avoir étudié le réseau de la motricité et du langage, à savoir s'il est intact ou altéré dans cette population.

CHAPITRE IV

EXPÉRIMENTATION 2

Dans ce chapitre, à l'aide d'une analyse « single-subject », nous allons voir que le réseau de la motricité et du langage semble dysfonctionnel chez la plupart des individus ayant un TDL. De plus, la présence de modulations significativement inférieures à la ligne de base, vue seulement dans un autre projet antérieur (non publié), nous permet de réfléchir à la signification des modulations dites neutres (non significativement différentes de la ligne de base).

4.1 Introduction

Le trouble développemental du langage ne comporte pas qu'un visage. Comme il a déjà été expliqué, les individus affectés par ce trouble éprouvent une difficulté dans le domaine du langage, mais ce ne sont pas les mêmes composantes du langage qui sont touchées chez les différents individus. Cette hétérogénéité a fait en sorte que pendant des décennies, les recherches en neurosciences sur les parties du cerveau affectées dans ce trouble s'avéraient contradictoires. De plus, les profils de la dysphasie (ancien nom du TDL) utilisés en recherche dans l'objectif de soutenir l'intervention clinique se sont révélés non représentatifs de la réalité sur le terrain, car à travers le développement de l'enfant ayant un TDL, les composantes sur lesquelles il est plus important d'intervenir changent.

Dans les dernières années, une hypothèse sur un réseau neuronal affecté ou altéré qui expliquerait le TDL a été proposée (Ullman et Pierpont, 2005). Il s'agit de l'hypothèse du déficit procédural. Toutefois, d'autres chercheurs actifs dans la recherche sur le TDL voient plusieurs lacunes dans cette théorie (Krishnan et al., 2016 ; Krishnan et Watkins, 2019 ; West et al., 2018, 2019). Dans ce projet, il est question de vérifier l'état d'un autre réseau neuronal, le réseau du langage et de la motricité. Dans l'expérimentation précédente, nous avons vu qu'il était possible de vérifier la présence de ces liens chez des adultes sans troubles neurologiques. L'écoute active des mots d'action amenait une réponse motrice dans la main droite significativement supérieure à la ligne de base chez tous nos participants, ce qui n'était pas le cas dans d'autres conditions. Même s'il s'agit d'une première recherche sur le sujet avec cette méthode et que l'échantillon était petit (n=14), cet effet constant chez nos participants sera considéré comme un indicateur de comparaison pour le groupe dont les participants ont un TDL.

Ensuite, dans le but de vérifier les composantes du langage dans lesquelles les participants rencontrent des difficultés et d'examiner s'il y a un lien entre celles-ci et la réponse motrice due aux stimuli, nous avons demandé à trois répondants, par participant, de remplir la version franco-québécoise du questionnaire *Children's communication checklist 2 (CCC-2)* (Bishop, 2006 ; Vezina et al., 2011 ; Vézina et al., 2013). Ces trois répondants sont : les participants, un de leurs parents ou tuteurs et un(e) intervenant(e) (enseignant, technicien en éducation ou orthophoniste). Nous prenons les résultats de ces 3 individus, car il a été démontré que les résultats des parents et des intervenants diffèrent parce qu'ils ne côtoient pas l'individu en question dans le même milieu (Vézina *et al.*, 2013). Les parents voient les forces et les faiblesses de leurs enfants dans leur milieu familial et leurs interactions sociales dans des circonstances telles qu'avec des amis et la famille, hors de la maison (ex. : dans des magasins) ou dans des loisirs (sport, art, etc.). Toutefois, les intervenants voient la performance des jeunes dans le cadre scolaire, un environnement plus exigeant dans l'accomplissement

de tâches nécessitant le langage (enseignant et technicien en éducation) ou dans un contexte d'évaluation et d'intervention sur les faiblesses du jeune (orthophonie). Étant donné que le projet se déroule avec des adolescents, les participants sont assez vieux pour mettre de l'avant leurs propres forces et faiblesses qu'ils vivent à l'école et hors de l'école au travers de ce questionnaire.

Le questionnaire CCC-2, dont la fonction principale est de vérifier si l'enfant a un TDL ou fait partie du spectre de l'autisme, nous donne un score pour chaque composante du langage et des composantes comportementales ainsi que sociales. Il sera donc question de voir s'il y a des corrélations entre les composantes du test ou les scores comptabilisés et les modulations de la force selon les conditions.

Étant donné que le design méthodologique est « single-subject », nous continuons d'analyser les deux mains. Ainsi, un participant gaucher pourrait avoir sa réponse motrice dans sa main gauche. Même si c'est dans de rares cas, le réseau langagier pourrait se retrouver dans l'hémisphère droit (Michel *et al.*, 2013) et ainsi être connecté directement avec la main gauche. Cela n'affectera pas nos résultats, puisque nous ne sommes pas dans un design de groupe. Ensuite, les stimuli présentés seront aussi les mots d'action et de non-action. Nos mots d'action sont des verbes. Chez les individus neurotypiques, l'apprentissage des noms se fait avant les verbes (Mestres-Missé *et al.*, 2009) et chez les populations TDL, les verbes sont plus difficiles à apprendre que les noms (Kambanaros, 2013). Par conséquent, il serait possible que les noms amènent une réponse motrice chez plus de participants comparativement aux verbes.

4.2 Méthodologie

4.2.1 Participants

Les participants à l'étude sont 13 adolescents ayant un trouble développemental du langage et ayant fait toute leur éducation en français. La moyenne d'âge est de 16,35 et l'ES est de 0,28. Selon le test de préférence manuelle d'Edinburgh (Oldfield, 1971) dix d'entre eux sont droitiers et trois sont gauchers (moy : 53, ES : 20,21). Le groupe était composé de cinq participants de sexe masculin et huit de sexe féminin. Les participants, même s'ils avaient des comorbidités, devaient avoir un diagnostic primaire de troubles développementaux de langage pour participer à l'étude. Le dernier critère d'inclusion est qu'il ne devait pas y avoir d'historique de problème auditif.

Les participants ont été recrutés dans une école du Centre de services scolaire de Laval et dans des organisations offrant des services pour les personnes ayant un diagnostic de TDL (Dysphasie Plus et Dysphasie Laurentides). La collecte de donnée a été interrompue par la pandémie, mais d'autres ont été organisées ou en cours de préparation à l'Institut Raymond-Dewar (inclus dans le CRIR), dans des écoles des centres de services scolaires des Mille-Îles et des Affluents ainsi que dans les organismes Dysphasie Québec et Dysphasie plus.

Ce projet a été approuvé par le comité d'éthique de la recherche (CÉR) du Centre de recherche interdisciplinaire en réadaptation du Montréal métropolitain (CRIR) et par le Centre de services scolaire de Laval (CSSL).

4.2.2 Matériels d'expérimentation

4.2.2.1 Matériels physiques

Le matériel d'expérimentation était constitué des capteurs de forces qui ont été utilisés dans les expérimentations 1A et 1B. Je vous réfère donc à la section 2.2.2.1.1. La seule différence est que le son vient du même ordinateur qui collecte les données, contrairement aux expérimentations précédentes dont le stimulus venait d'un tiers ordinateur qui envoyait les stimuli et les signaux aux deux ordinateurs qui recueillaient les données des capteurs et de l'électroencéphalogramme.

4.2.2.2 Matériels numériques

Pour les stimuli, ils sont issus de la même banque de mots. Donc, pour révision, je vous réfère à la section 2.2.2.2. Toutefois, les listes de mots présentées sont différentes de celles utilisées dans les expériences 1A et 1B. Les adolescents ayant un TDL peuvent avoir de la difficulté à comprendre certains mots. Nous avons donc fait vérifier la liste de mots par deux orthophonistes de l'Institut Raymond-Dewar qui ont identifié sept mots d'action et sept de NA qui devraient être compris par les participants ayant un TDL. Étant donné qu'il était possible qu'un participant ne comprenne pas l'un des mots, il a été décidé de dresser des listes d'écoutes avec tous les mots sélectionnés par les orthophonistes, au lieu de cinq pour chacune des catégories de mots. Ainsi, nous disposons de listes de mots de remplacement au cas où l'un des mots serait incompris par le participant. Les mots sélectionnés sont :

- Avion
- Chambre
- Étoile
- Licorne
- Requin
- Sentier
- Tempête
- Colorier
- Découper
- Frapper
- Jeter
- Montrer
- Prendre
- Serrer

Ensuite, ne sachant pas d'avance quel mot il serait possible d'utiliser pour que tous les participants soient exposés au même nombre de stimuli, pour chaque mot, trois listes d'écoute ont été produites avec celui-ci en cible 10, 11 et 12 fois pour un total de 42 listes d'écoute. Elles ont été conçues sur le logiciel Audacity version 2.3.2. Les listes ont été créées de la même façon que dans les expérimentations précédentes. Le mot cible était mélangé avec 15 noms et 15 verbes ne commençant pas par le même phonème. Le mot cible était répété entre 10 et 12 fois, ce qui donnait des listes entre 40 et 42 mots avec une seconde de silence entre chacune d'elles, pour une durée d'environ 75 secondes. La durée des listes a suivi les recommandations de Nazir et al. (2017). 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.

4.2.3 Protocole

Les participants étaient présélectionnés par les écoles ou les organismes. Lors de la rencontre, nous vérifiions les informations des participants pour nous assurer qu'ils remplissaient bien nos critères d'inclusion (fiche des participants en Appendice B). Nous revenions sur le déroulement de la séance et nous nous assurons que le participant était toujours consentant. Les formulaires étaient vérifiés par la même occasion. Le premier questionnaire rempli avec le participant est celui de la préférence manuelle d'Edinburgh (Oldfield, 1971). Ensuite, nous remplissions le CCC-2 avec le participant. L'expérimentateur lisait les questions pour faciliter le processus. Lors des séances d'expérimentation dans les locaux des organismes soutenant les jeunes ayant un TDL, les parents étaient le plus souvent présents durant la rencontre. Sans intervenir, ils remplissaient leur questionnaire CCC-2. Par la suite, nous demandions au participant de nous mimer les mots d'action et de nous donner une courte explication ou description des mots de non-action pour vérifier qu'ils comprennent nos mots cibles.

Ainsi, nous sélectionnons au hasard 5 mots de chaque catégorie parmi les mots compris par les participants.

4.2.4 Traitement des données des capteurs de force

Le traitement des données est identique aux expérimentations 1A et 1B. Je réfère donc le lecteur à la section 2.2.4.2 pour l'explication de cette section. Toutefois, l'analyse « single-subject » nous permet de ne pas exclure les participants pour une condition sous le seuil de 70 % des données valides. Toutes les conditions valides par participants sont conservées et compilées tout comme dans l'expérience 1B.

4.2.5 Traitement des données du CCC-2

Les résultats des questionnaires sont calculés pour chaque catégorie selon les instructions. Les catégories sont : la phonologie et la fluence, la morphosyntaxe, la sémantique, la cohérence, l'initiation, le langage stéréotypé, l'utilisation du contexte, la communication non verbale, les relations sociales et les intérêts. Étant donné les antécédents dans la littérature concernant les résultats au questionnaire CCC-2 qui diffèrent entre les parents et les intervenants pour un même individu (Vézina *et al.*, 2013), nous avons vérifié la différence des résultats entre les parents et les intervenants, les parents et les adolescents et entre les intervenants et les adolescents avec le test des rangs signés de Wilcoxon. Nous avons constaté une différence significative entre le score brut des parents et des intervenants pour les catégories suivantes : la syntaxe, la sémantique et les relations sociales. Il existe une différence notable entre les participants et les intervenants pour la catégorie des intérêts (voir Annexe C, tableau 4.10 pour tous les scores z). Il est à noter que ces différences ne sont pas calculées avec les mêmes méthodes statistiques que dans les articles qui vérifient les qualités métrologiques du test, car notre échantillon est plus petit que dans ces articles. Puisque nous retrouvons des différences dans peu de catégories entre les parents et les intervenants et qu'il n'y a pas de différence entre les participants et les parents, ainsi

qu'entre les participants et les intervenants (à l'exception de la catégorie des intérêts), nous allons utiliser la moyenne des trois scores pour faire les corrélations. Comme il n'existe pas de normes pour la population franco-qubécoise, à l'exception de la tranche de 7 à 9 ans venant de l'étude de Vézina et al. (2013), pour effectuer les corrélations, nous utiliserons les scores bruts (utilisés pour vérifier les différences de scores entre les groupes de répondants) et les scores normalisés (selon l'édition américaine). Nous utiliserons les deux, car normalement, les résultats de ce test doivent être standardisés.

4.2.6 Analyses statistiques

À la suite des conclusions de l'expérience 1B, nous reproduisons seulement la première analyse, soit une ANOVA à un facteur à mesure répétée (la latence), pour voir si les modulations changent dans le temps après l'écoute des stimuli. Il y a 4 mesures : préstimulus, 100 à 300 ms, 300 à 500 ms et 500 à 800. Lorsque l'ANOVA est significative, un post hoc LSD (least significant difference) est effectué pour vérifier si la force de la préhension des 3 fenêtres poststimuli est significativement différente de celle préstimuli. Cette analyse est réalisée pour les modulations de chaque main à la suite de l'écoute des deux stimuli, les mots d'action et les mots de non-action. Il peut donc y avoir jusqu'à 4 ANOVAS par participant.

Ensuite, des corrélations de Spearman sont faites entre les scores du CCC-2 et les MF des participants pour déterminer s'il y a un lien entre les forces ou les faiblesses des participants et les changements des MF dans chaque main à la suite des différents stimuli.

4.3 Résultats

Pour une lecture plus simple, les résultats sont compilés sous forme de tableau dans lequel il est seulement mentionné si les ANOVAS sont significatives ou non. Les résultats complets sont à l'annexe C.

4.3.1 Modulations de la force de préhension

Tableau 4.1 Sommaire des résultats des ANOVAS intraconditions par participant du changement de la modulation de la force dans le temps. Résultats complets en Annexe C, tableau 4.12.

Participant	Main droite Mot d'action	Main droite Mot de non-action	Main gauche Mot d'action	Main gauche Mot de non-action
1	Cond. rejetée	Sig.	Cond. rejetée	Cond. rejetée
2	Cond. rejetée	Cond. rejetée	Cond. rejetée	Cond. rejetée
3	Sig.	Sig.	Non sig.	Sig.
4	Cond. rejetée	Cond. rejetée	Cond. rejetée	Cond. rejetée
5	Sig.	Non sig.	Non sig.	Non sig.
6	Non sig.	Non sig.	Non sig.	Sig.
7	Sig.	Sig.	Cond. rejetée	Non sig.
8	Sig.	Sig.	Non sig.	Non sig.
9	Non sig.	Non sig.	Sig.	Non sig.
10	Cond. rejetée	Cond. rejetée	Cond. rejetée	Cond. rejetée
11	Sig.	Sig.	Cond. rejetée	Cond. rejetée
12	Sig.	Sig.	Sig.	Sig.
13	Non sig.	Non sig.	Non sig.	Sig.
Totaux	6 Sig. 3 Non Sig.	6 Sig. 4 Non Sig.	2 Sig. 5 Non Sig.	4 Sig. 4 Non Sig.

Légende : Sig. : l'ANOVA significative ; Non-sig : l'ANOVA est n'est pas significative ; Cond. rejetée : la condition est rejetée, car plus de 25 % des données sont exclus

Tableau 4.2 Sommaire des résultats du post hoc LSD entre les modulations préstimuli et poststimuli. Résultats complets en Annexe D, tableau 4.13.

Participant	Main droite Mot d'action	Main droite Mot de non-action	Main gauche Mot d'action	Main gauche Mot de non-action
1	-	Non-sig.	-	-
2	-	-	-	-
3	2-3	2	A. Non-sig.	Non-sig.
4	-	-	-	-
5	1*-2*-3*	A. Non-sig.	A. Non-sig.	A. Non-sig.
6	A. Non-sig.	A. Non-sig.	A. Non-sig.	Non-sig.
7	3	1*	-	A. Non-sig.
8	2-3	3	A. Non-sig.	A. Non-sig.
9	A. Non-sig.	A. Non-sig.	3	A. Non-sig.
10	-	-	-	-
11	3	2-3	-	-
12	1-2-3	1-2-3	2	1-2-3
13	A. Non-sig.	A. Non-sig.	A. Non-sig.	3*
Nb. Part. Mod. positives	5/9	4/10	2/7	1/8
Nb. Part. Mod. négatives	1/9	1/10	0/7	1/8
Nb. Part. Mod. Neutre	3/9	5/10	5/7	6/8

Légende : 1 : significatif supérieur à la ligne de base entre 100 et 300 ms ; 2 : idem entre 300 et 500 ms ; 3 : idem entre 500 et 800 ms ; A Non-sig : l'ANOVA est n'est pas significative ; - : condition rejetée ; * significativement inférieur à la ligne de base.

En résumé, dans la main droite de neuf participants, à la suite des mots d'action, les modulations sont significativement supérieures à la ligne de base pour cinq d'entre eux. Elles sont inférieures à la ligne de base pour un sur neuf et considérées comme neutres pour les trois autres. Dans la main droite de dix participants, à la suite des mots de non-action, les modulations sont significativement supérieures à la ligne de base pour quatre d'entre eux. Elles sont inférieures à la ligne de base pour un sur dix et considérées comme neutres pour les cinq autres. Dans la main gauche de sept participants, à la suite des mots d'action, les modulations sont significativement supérieures à la ligne de base pour deux d'entre eux. Aucun participant n'a de modulations inférieures à la ligne de base et elles sont considérées comme neutres pour les cinq autres. Dans la main gauche de huit participants, à la suite des mots de non-action, les modulations sont significativement supérieures à la ligne de base pour l'un d'entre eux. Elles sont inférieures à la ligne de base pour un sur huit et considérées comme neutres pour les six autres.

4.3.2 Corrélations entre les modulations de la force et les résultats du questionnaire CCC-2

Nous avons fait des corrélations de Spearman avec les valeurs moyennes des participants pour les trois fenêtres de temps dans les trois fenêtres d'analyse, en ajoutant une 4^e valeur, qui est la moyenne de ces trois fenêtres d'analyse, et les scores bruts et standardisés du CCC-2. Il n'y avait aucune corrélation significative entre les modulations de la force et les scores du CCC-2.

4.4 Discussion.

Le premier constat est que les résultats des adolescents ayant un TDL sont différents des adultes sans trouble neurologique. Le taux de positivité quant aux modulations de la force comparées à la ligne de base est inférieur dans toutes les conditions (voir le

tableau 4.3), plus particulièrement à la suite des mots d'action qui n'apportent pas une réponse uniforme entre les participants. Ensuite, on voit des cas particuliers comme trois participants dont aucun stimulus n'apporte de modulations supérieures à la ligne de base et même, dans certains cas, de modulations significativement inférieures à la ligne de base. Dans le même ordre d'idées, nous n'avons observé des modulations positives que pour deux participants dans la main gauche. Et finalement, aucune corrélation n'a été trouvée entre les résultats du CCC-2 et les modulations de la force. Analysons ces points un par un en commençant par le dernier.

Tableau 4.3 Nombre et pourcentage de participants dont les modulations de la force sont supérieures à la ligne de base dans le groupe contrôle (exp. 1B) et le groupe ayant un TDL

	Main droite Mot d'action	Main droite Mot de non-action	Main gauche Mot d'action	Main gauche Mot de non-action
Nb. de participants du gr. contrôle (exp. 1B)	11/11	8/12	10/11	10/13
Pourcentage de positivité du gr. contrôle (exp. 1B)	100 %	67 %	91 %	77 %
Nb. de participants du gr. ayant un TDL	5/9	4/10	2/7	1/8
Pourcentage de positivité du gr. ayant un TDL	55 %	40 %	29 %	13 %

4.4.1 L'absence de corrélation

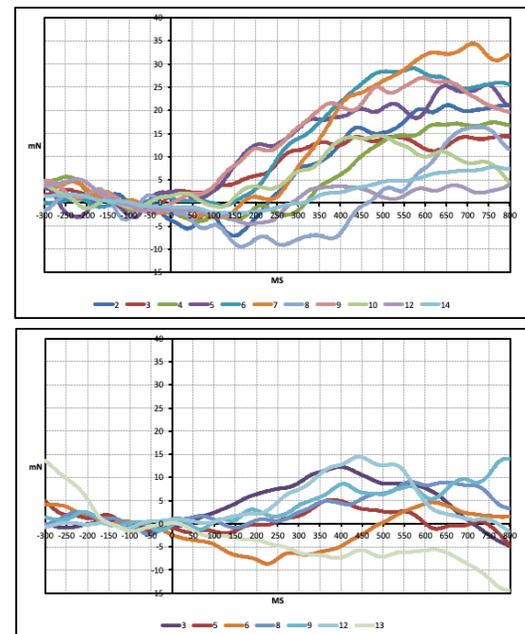
Nous nous serions attendus à une possible corrélation entre les modulations de la force, plus particulièrement pour celles des mots d'action, et les scores suivants (issus du questionnaire CCC-2) : la sémantique, la somme du score général ou du score général standardisé. Toutefois, il y a deux raisons qui expliqueraient l'absence de corrélations. La première est que le nombre de participants est insuffisant, même pour l'utilisation d'une corrélation non paramétrique (de Spearman). Dans ce cas-ci, un projet de plus grande envergure sur la question pourrait mettre en lien le score de la composante sémantique ou le score global du CCC-2 et des modulations de la force. Cependant, il se peut qu'il n'y ait pas de corrélation, non pas parce qu'il n'y a pas de liens entre les difficultés sémantiques des participants et la réponse motrice, mais plutôt en raison du questionnaire CCC-2. Ce questionnaire, qui peut indiquer les forces et faiblesses d'un enfant ou d'un adolescent ayant un TDL ou étant dans le spectre de l'autisme, est surtout fait pour déterminer dans lequel de ces troubles l'enfant se situe. Il ne s'agit pas d'une évaluation en profondeur des capacités linguistiques des participants. Par conséquent, il est possible que le test ne soit simplement pas assez sensible pour nous permettre de faire de telles corrélations.

4.4.2 Main gauche : l'absence de modulations chez la majorité de nos participants

L'analyse des modulations de la force dans la main gauche fait l'objet de beaucoup moins d'articles. Nous trouvons seulement ceux de da Silva et al. (2018) et de Juárez et al. (2019). Dans les deux cas, les modulations de la force dans la main gauche sont supérieures à la ligne de base pour les groupes avant 300 ms après l'écoute des mots d'action. Les résultats de l'analyse « single-subject » des individus adultes étaient que les modulations étaient supérieures à la ligne de base chez tous les participants sauf 1 (10/11). Les résultats des adolescents ayant un TDL sont très différents. Même en valeur brut, il est possible d'observer une différence. Pour le groupe ayant un TDL, les moyennes des participants ne dépassent pas 15 mN (Figure 4.1, graphique du bas),

alors que les modulations de la force de quasiment tous les participants du groupe contrôle vont dépasser cette valeur (Figure 4.1, graphique du haut). En revenant sur les résultats statistiques, seulement deux individus ayant un TDL ont des modulations de la force significativement supérieures à la ligne de base dans les deux conditions et un dans la condition de mots d'action seulement. Cette différence s'explique par le fait qu'il est possible que l'aire motrice supplémentaire (AMS) ne fasse pas partie ou ait une intégration partielle au réseau de la motricité et du langage chez une partie de ceux ayant un TDL. Cette aire fait partie du réseau de la mémoire procédurale et elle participe aussi à la coordination des fonctions entre les deux hémisphères. La révision de Hertrich et al. effectuée en 2016 souligne la participation de cette aire dans l'intégration prosodique et syntaxique, dans la désambiguïisation lexicale, la recherche du contexte et dans le mécanisme du discours interne pendant l'encodage du langage. Si ces éléments sont plus contextuels que sémantiques, il n'en demeure pas moins que c'est aussi une aire qui fait partie du réseau de contrôle et de la planification des mouvements de la main. Donc, l'absence de modulations de la force dans la main gauche pourrait s'expliquer par l'hypothèse que cette aire serait altérée ou qu'elle ne serait pas intégrée au réseau de la motricité et du langage, ce qui pourrait être aussi lié à d'autres difficultés dans les composantes du langage qui nécessitent les informations contextuelles. Étant donné que nous n'avons pas obtenu de résultats positifs des corrélations pour les raisons énumérées plus haut, nous ne pouvons que poser une hypothèse. Il est possible que les

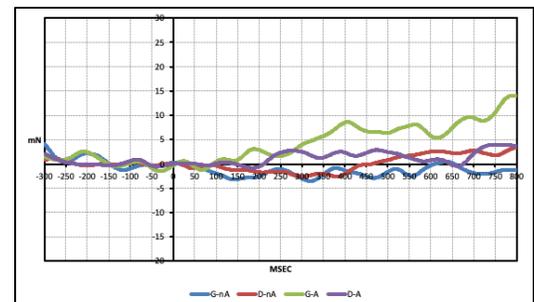
Figure 4.2 Graphiques des MF moyennes par participant de la main gauche à la suite de l'écoute de mots d'action pour le groupe contrôle (exp. 1B) (graphique du haut) et le groupe ayant un TDL (graphique du bas)



participants qui ont des modulations dans la main gauche, particulièrement pour la condition de mots d'action, rencontrent peu de difficultés (ou pas) avec la sémantique et la syntaxe, car l'AMS serait sans atteinte et bien intégrée au réseau motricité et langage dans leur cas. Cette hypothèse serait à valider avec des tests plus spécifiques de ces composantes du langage, jumelés avec une imagerie par résonance magnétique après avoir vérifié les modulations de la force des participants ayant un TDL. Il serait aussi possible d'examiner l'effet des modulations de la force chez des sujets sains après une inhibition de l'AMS par stimulation électromagnétique transcrânienne.

Je tiens à prendre le temps de regarder les données du participant 9 (figure 4.2). Ce participant est 100 % droitier selon son score au test d'Edinburgh (Oldfield, 1971). Pourtant, nous observons seulement dans sa main gauche des modulations supérieures à la ligne de base. Les modulations des autres conditions sont considérées comme neutres. Il est difficile d'expliquer son cas. Des modulations qui ne sont que dans la main gauche auraient pu être envisagées chez un sujet gaucher, car dans de rares cas, le langage peut être latéralisé à droite (Michel *et al.*, 2013). Cependant, si le score au test d'Edinburgh est bon, ce n'est pas le cas. L'absence de modulations dans la main droite, à la suite des mots d'action, pourrait s'aligner sur l'hypothèse de problèmes dans l'AMS ou de connectivité avec l'AMS, mais à l'inverse des autres participants ayant des modulations à droite.

Figure 4.3 Graphique des MF du participant 9



Légende : G : main gauche ; D : main droite ; nA : mots de non-action ; A : mots d'action

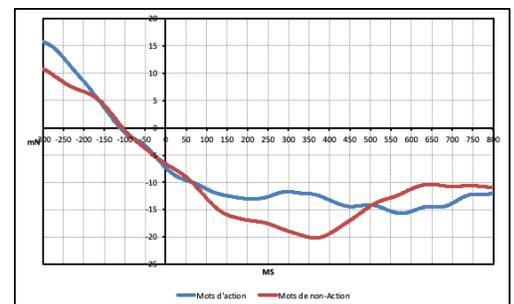
4.4.3 Les cas de modulations neutres et inférieures à la ligne de base

Dans notre groupe d'adolescents ayant un TDL, nous sommes en présence de résultats qui n'ont pas été vus précédemment dans la littérature avec l'usage de mots isolés

comme stimuli. Certains participants n'ont aucune modulation supérieure à la ligne de base (participant 6) et ce qui est plus particulièrement intéressant est la présence de modulations significativement inférieures à la ligne de base chez deux participants. Ce dernier résultat remet en question l'interprétation des résultats neutres. Les modulations qui n'augmentent pas significativement au-dessus de la ligne de base étaient interprétées comme une absence d'activité motrice induite par le traitement sémantique.

Il est vrai que de tels résultats n'avaient pas été vus dans la littérature, mais des modulations significativement inférieures à la ligne de base font partie des résultats de mon projet antérieur qui est l'objet de mon mémoire de maîtrise. Dans la main gauche d'un groupe d'enfants ayant de 5 à 11 ans, les modulations de la force s'avéraient significativement inférieures à la ligne de base (Figure 4.3)(Labrecque, 2016). Une difficulté à expliquer les résultats à l'époque et la priorisation d'autres projets n'ont pas mené à la publication de ces résultats, bien qu'ils soient intéressants. Je reprends donc une hypothèse proposée à l'époque, en tentant de l'enrichir de nouveaux éléments. Les modulations dites neutres ne se définissent pas nécessairement comme l'absence de modulations, mais un certain contrôle de la force de préhension stimulé par le traitement des mots ou, pourrait-on aussi dire, une efférence non inhibée plus petite de l'activité cérébrale produite dans le réseau de la motricité et du langage. Cela pourrait être dû à une intégration moins complète de certaines aires cérébrales ou à des liaisons plus faibles dans le réseau du langage et de la motricité. Cela reste une hypothèse, mais elle est basée sur l'idée que les modulations inférieures à la ligne de base sont celles dont les stimuli n'ont aucun effet sur la force de préhension, car ce résultat signifie que la force de préhension diminue continuellement comme dans l'expérimentation 1 de l'article de Nazir et al. (2017).

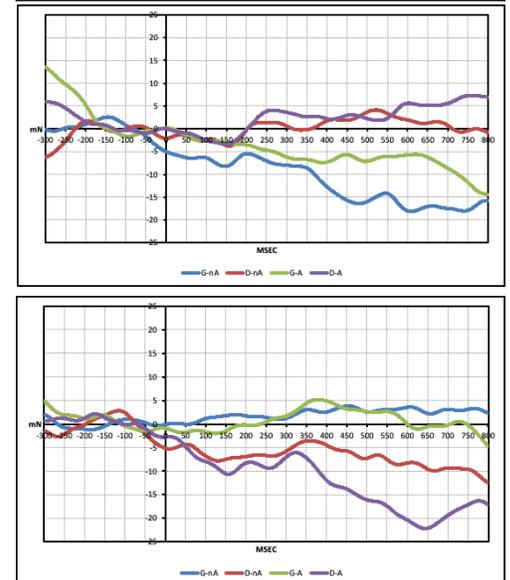
Figure 4.4 Graphique des modulations de la force de la main gauche des enfants ayant entre 5 et 11 ans (Labrecque et al. 2016)



Dans cette expérience, tenir le capteur de force en continu sans stimuli amène une diminution de force constante, malgré de légères remontées occasionnelles qui sont un ajustement normal de la prise au cours du temps (Forssberg *et al.*, 1991). Chez nos deux participants, dans une certaine condition, la force continue de descendre, malgré l'apparition du stimulus.

En revenant sur les données de mon mémoire, chez les enfants de moins de 11 ans, l'immaturation du corps calleux et/ou de l'aire pariétale (Toga *et al.*, 2006) pouvait expliquer que le traitement sémantique, qui avait un effet sur les modulations de la main droite, n'influence pas la force de préhension de la main gauche. Chez nos participants ayant un TDL, cela semble être lié à l'absence de participation d'un hémisphère du cerveau dans le réseau du langage et de la motricité qui pourrait être due aux corps calleux et aux connexions interhémisphériques, comme souligné dans la section précédente. Cela pourrait être un problème sur le plan de l'AMS ou de sa participation au réseau de la motricité et du langage, ou encore un problème similaire avec la région intrapariétale antérieure. Toutefois, je m'engagerais moins vers une problématique dans la dernière région, car chez le participant 5 (Figure 4.4 graphique du haut), on trouve des modulations inférieures à la ligne de base pour la main droite alors que pour le participant 13 (Figure 4.4 graphique du bas), il s'agit de la main gauche. Néanmoins, pour ces deux participants, les modulations de l'autre main sont considérées comme neutres, ce qui, dans l'hypothèse présentée ici, voudrait dire que le traitement sémantique des mots d'actions de la main, auquel la région pariétale

Figure 4.5 Graphiques des modulations de la force des participants 5 (au-dessus) et 13 (en dessous)



participe, a un effet sur la force de préhension en la maintenant stable au lieu qu'elle diminue en continue.

Le dernier élément à souligner est le résultat du questionnaire d'Edinburgh sur la préférence manuelle. Les deux participants sont en théorie de vrais droitiers (89 % et 100 %). Le participant 13 a un résultat attendu selon son pourcentage de droiterie, car les modulations inférieures à la ligne de base sont dans sa main gauche, mais pour le participant 5, les modulations sont inférieures à la ligne de base dans sa main droite et les modulations de sa main gauche sont stables (neutres). Une première hypothèse pour expliquer ce résultat est que ce participant fait partie des rares cas de droitiers dont le langage est latéralisé à droite ou est diffus entre les hémisphères (Mazoyer *et al.*, 2014). Une deuxième hypothèse est que l'indice de préférence manuelle que nous utilisons n'indique pas les liens entre la latéralité du langage et de la préférence manuelle, car le test d'Edinburg se concentre sur des actions quotidiennes, alors que les liens entre la préférence manuelle et la latéralisation du langage seraient plutôt avec la main qui est préférée pour la gestuelle liée au langage (pointage ou mouvement qui accompagne le langage) (Tzourio-Mazoyer *et al.*, 2020). Ces hypothèses pourraient aussi expliquer le cas du participant 9, vu à la section précédente, qui avait seulement des modulations supérieures à la ligne de base dans la main gauche en étant en théorie droitier. Toutefois, il est possible que l'explication de nos cas particuliers soit toute autre, car les deux hypothèses sont basées sur des études effectuées chez l'adulte sain et quelques-unes chez des enfants sains. Comme les auteurs de la deuxième hypothèse le soulignent, il manque encore des études évaluant la latéralisation du langage et la préférence manuelle à travers le développement sur un grand échantillon. J'ajouterais qu'il faudrait aussi des échantillons d'enfants ayant des troubles neurodéveloppementaux pour effectuer la comparaison.

4.4.4 Les mots d'action dans la main droite : présence et absence

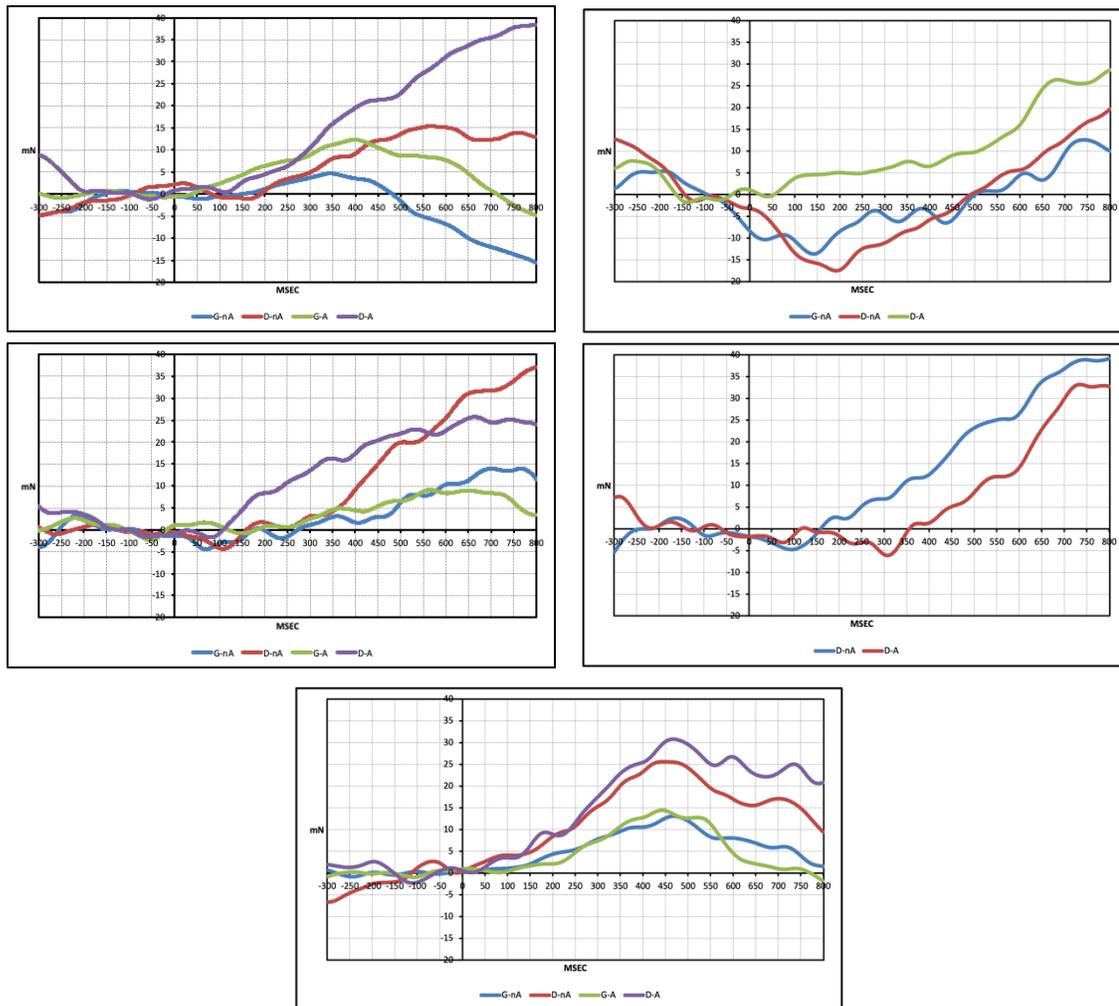
Dans l'expérimentation précédente, la représentation du lien entre la motricité et le langage est la présence de modulations de la force dans la main droite à la suite de l'écoute des mots d'action chez tous les participants. À la suite des résultats neutres et inférieurs vus chez les participants ayant un TDL, pour lesquels nous pouvons faire un lien avec les résultats des enfants de 5 à 11 ans de mon mémoire, nous pourrions émettre l'hypothèse que les modulations neutres représenteraient un lien incomplet ou plus faible. Toutefois, les modulations qui sont plus fortes que la ligne de base semblent refléter un lien complet et fort entre le langage et la motricité, particulièrement pour la condition de mots d'action. Donc, regardons les résultats du groupe TDL.

Les cas des participants 5, 6 et 13 que nous avons examinés dans les sections précédentes n'ont aucune modulation significativement supérieure à la ligne de base pour les mots d'actions pour les deux mains. Il semble que chez ces participants, le réseau de la motricité et du langage soit plus faible ou incomplet. Ce réseau plus faible ou incomplet, ne permettant pas l'enracinement des mots avec le système sensorimoteur, pourrait peut-être expliquer, du moins en partie, la difficulté d'apprentissage du langage. Cela s'accorde avec la difficulté plus importante de l'apprentissage des verbes chez les enfants ayant un TDL (Kambanaros, 2013). Lors de la présentation des résultats aux congrès *Embodiment and Situated Language processing 2021*, nous avons proposé le terme *motor grounding deficit*, ou un trouble d'enracinement moteur pour expliquer leur cas.

Le participant 9, comme les participants nommés dans la section précédente, n'a pas de modulations de la force supérieures à la ligne de base dans la main droite, mais il en a dans la main gauche. Il est donc possible que son réseau de la motricité et du langage soit fonctionnel, du moins en bonne partie, mais latéralisé à droite. Ceci expliquerait l'activité dans la main gauche.

Ensuite, les participants 3, 7, 8, 11 et 12 (Figure 4.5 sur la page suivante) ont des modulations supérieures à la ligne de base dans leur main droite à la suite de l'écoute des mots d'action. Ainsi, il semblerait que leur réseau de motricité et langage soit plus fonctionnel que les participants 5-6-13. Si on intègre le participant 9 à ceux qui ont un réseau motricité et langage plus fonctionnel, la proportion sera que les deux tiers des participants ont un réseau avec un niveau de fonctionnalité assez élevé alors que pour l'autre tiers, le réseau est plus faible ou incomplet (ex. : l'intégration partielle de certaines aires comme l'AMS). Ils auraient un *motor grounding deficit*.

Figure 4.6 Graphiques des participants 3 (1^{re} rangée à gauche) ; participant 7 (1^{re} rangée à droite) ; participant 8 (2^e rangée à gauche) ; participant 11 (2^e rangée à droite) ; participant 12 (3^e rangée)



Légende : G : main gauche ; D : main droite ; nA : mots de non-action ; A : mots d'action

4.4.5 Limites et applications

Avant de prendre en compte les possibles impacts des résultats sur les services aux personnes ayant un TDL, rappelons les limites de cette expérimentation. Premièrement, la taille de l'échantillon est petite. Ce n'était pas prévu à l'origine du projet, mais la pandémie du virus Sar-Cov-2 a provoqué l'arrêt de la collecte de données et il était impossible de la reprendre quand certaines mesures sanitaires ont été levées en raison du calendrier de mon doctorat. Ensuite, pour les mêmes raisons, il s'est avéré impossible de faire des analyses «single-subject» sur un groupe constitué d'adolescents ayant un âge similaire à ceux ayant un TDL. Nous avons donc comparé les données du groupe ayant un TDL avec des adultes sans troubles neurologiques. Si nous avons expliqué ce qui nous permettait d'effectuer une telle comparaison, il n'en demeure pas moins que pour une question de rigueur scientifique, il serait mieux à l'avenir de comparer des groupes constitués d'individus aux caractéristiques similaires telles que l'âge et le sexe.

En ce qui a trait à la manière dont nos résultats pourraient avoir un impact sur l'intervention pédagogique et clinique du TDL, s'ils sont reproduits à plus grande échelle, nous avons vu que chez une partie de nos participants ayant un TDL, dans notre cas environ les deux tiers, il semble y avoir présence de liens entre la motricité et le langage. Étant donné que le réseau de la motricité et du langage semble suffisamment fonctionnel, ces individus seraient probablement sensibles à des interventions cliniques ou pédagogiques incluant le mouvement et possiblement aussi l'imagerie. Cette sensibilité à ce type d'intervention nous pousse à croire qu'il y aurait des effets bénéfiques pour eux. Toutefois, cela reste à vérifier en essais cliniques. Ensuite, nous n'avons pas trouvé, pour l'instant, d'indicateur autre que l'analyse des modulations de la force de préhension pour nous indiquer si l'individu TDL a ou n'a pas cette sensibilité à l'usage du mouvement dans l'apprentissage du langage. Ainsi, les capteurs de force pourraient devenir un appareil servant à poser un diagnostic complémentaire

qui aiderait à individualiser l'intervention selon la présence des liens entre la motricité et le langage chez l'individu. Finalement, pour les individus ayant un TDL, mais se trouvant dans la situation où leur réseau de motricité et langage est dysfonctionnel ou absent, est-ce qu'il est possible de renforcer ou de créer ce lien en incluant chez eux aussi l'utilisation du mouvement ? Est-ce que pour des raisons biologiques qui nous sont inconnues, ces individus ne peuvent apprendre par le mouvement ? Serait-il possible que l'utilisation du mouvement n'ajoute pas de bénéfice supplémentaire par rapport aux méthodes d'intervention actuelles ? Des réponses à ces questions pourraient être apportées en recherche clinique.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Cette thèse de doctorat a constitué dans toutes ses étapes un projet exploratoire. Nous avons jumelé deux techniques pour mesurer des changements physiologiques, l'activité électrique du cerveau et les changements de la force de préhension involontaire et imperceptible chez les sujets. Cela a permis de corrélérer statistiquement et temporellement le potentiel évoqué p200 et les modulations de la force, les deux étant sensibles aux classes lexico-sémantiques. Les ajustements méthodologiques pour le jumelage des techniques ont représenté l'occasion de tenter d'analyser les liens entre la motricité et le langage à l'échelle de l'individu dans un design « single-subject ». Nous avons vu que les analyses comparant directement les conditions entre elles nous donnent peu d'information étant donné la plus grande variabilité des données des individus comparativement à celle des groupes. Il semble que la comparaison des conditions avec leur ligne de base soit un meilleur indicateur de la présence et de la fonctionnalité du réseau motricité et langage, particulièrement avec les mots d'action et la réponse motrice dans la main droite. Finalement, chez les adolescents ayant un TDL, pour un tiers d'entre eux, le réseau de la motricité et du langage semble soit incomplet, soit dysfonctionnel, soit absent. Notre échantillon étant limité dans le contexte de la pandémie, cette proportion n'est pas généralisable pour l'instant. Néanmoins, cette différence avec la population contrôle qui peut être appelée un « motor grounding deficit » est un élément à prendre en compte dans l'étude de cette population dans le but d'optimiser les services qui lui sont octroyés. En se penchant sur les services offerts à cette population, il faut retenir que les autres participants semblaient avoir un réseau de la motricité et du langage fonctionnel, ce qui signifie

qu'une partie de la population TDL pourrait bénéficier de l'intégration du mouvement dans les interventions en clinique et en milieu scolaire.

Les résultats de ce projet permettent aussi de remettre en perspective les résultats des recherches antérieures avec les capteurs de force. Comme expliqué dans la discussion de la dernière expérimentation, nous avons vu dans des projets antérieurs des modulations de la force de préhension neutres et négatives. Les modulations neutres étaient interprétées comme l'absence de ce lien entre la motricité et le langage en raison de l'immaturation de certaines aires cérébrales comme la région intrapariétale. Toutefois, une étude d'imagerie par résonance magnétique a montré que les régions qui s'apparentent à M1, AMS et l'aire prémotrice s'activent à l'écoute passive de verbes (James et Maouene, 2009). J'utilise le terme « s'apparente », car les auteurs soulignent qu'il n'y a pas de cartographie des régions du cerveau aussi développée chez l'enfant que chez l'adulte. Cela ne remet pas en doute l'effet de l'immaturation de l'AIP, mais permet de concevoir que ce réseau motricité et langage sert à l'enracinement dans le processus d'apprentissage comme nous l'avons vu pour les concepts mathématiques à l'aide de la gestuelle des mains (Cook *et al.*, 2008). Si ce réseau s'avère fonctionnel pour l'apprentissage malgré l'immaturation de certaines aires à différents âges, il serait intéressant de voir les limites de l'apprentissage par l'interaction du corps avec l'environnement en fonction de l'âge.

Un autre élément à considérer est la composante temporelle du traitement linguistique. Le modèle de Friederici (2002) a été utilisé avec les capteurs de force depuis la publication de 2012 d'Aravena et al. Toutefois, ce modèle présente le traitement sémantique un peu plus tard que celui proposé par Hauk dans son rapport de 2016. Il dévoile son propre modèle basé sur la littérature présentée dans son texte. Il n'est pas question ici d'opposer ces deux modèles, mais de les mettre en contexte. Le modèle de Friederici (2002) aborde le traitement auditif des phrases en se basant sur la littérature

de l'époque. Il y aurait dans ce contexte un traitement syntaxique qui précéderait le traitement sémantique, pour combiner et traiter ces informations à la dernière étape. Le traitement sémantique est présenté, postérieur à 300 ms. Le modèle de Hauk (2016) s'applique au traitement des mots lus dans le contexte d'une tâche expérimentale. La récupération de l'information sémantique du mot se situerait avant 250 ms, et même parfois avant 200 ms selon les études. Selon ce modèle, on pourrait croire que cela indiquerait que les modulations de la force significativement différentes de la ligne de base que nous avons enregistrées ne sont en fait pas une représentation du traitement sémantique. Ce n'est cependant pas le cas. Il est vrai que dans l'étude 1B et 2 (les deux analyses «single-subject»), les résultats se révèlent significatifs dans la majorité des cas (quand ils le sont pour le groupe TDL) dans la fenêtre de temps analysée de 300 à 500 ms. Toutefois, les études antérieures telles que celle de da Silva et al. (2018) et l'étude 1A, publiée par Juárez et al. (2019), ont fait un découpage temporel en de plus petits segments (50 ms) et des effets s'avèrent significatifs à 250 ms et avant. Comme mentionné dans la discussion de l'étude 1A, en tenant compte du temps de transport du signal efférent des aires corticales de la motricité à la main (18-20 ms), il y a une corrélation temporelle. Il est possible que si nous avions effectué un découpage plus petit de données, nous aurions observé un effet significatif vers 250 ms. Cependant, dans les méthodologies des études 1B et 2 de ce projet, nous réalisons déjà beaucoup d'analyses statistiques et il a été jugé préférable de diminuer le nombre de variables pour diminuer la possibilité d'erreur de type 1. Il faut aussi tenir compte du fait que l'objectif de ce projet est d'étudier les liens entre la motricité et le langage chez des populations en développement, typique et atypique. Il est plus difficile de définir la fenêtre temporelle liée au traitement sémantique alors qu'il n'existe pas, à ma connaissance, de modèle temporel du traitement linguistique en fonction de l'âge. Nos données chez l'adulte, et à la limite chez l'adolescent, peuvent suivre ces modèles, mais rien n'indique que nous pouvons les utiliser chez l'enfant.

Ensuite, en ce qui a trait à l'analyse statistique, le choix de l'analyse «single-subject» était d'obtenir des résultats chez les individus pour envisager une approche thérapeutique. Je reviendrai sur la suite de la recherche pour aller vers l'application clinique ou pédagogique. Si nous nous intéressons à la compréhension fondamentale des mécanismes de traitement des mots et des différentes variables qui peuvent influencer les modulations de la force de préhension induite par le langage, d'autres approches statistiques pourraient nous en apprendre davantage. Un modèle mixte comme celui présenté par Baayen et al. (2008) nous permettrait de déterminer si des caractéristiques linguistiques comme la fréquence et le nombre de phonèmes ont un effet sur les MF. Nous pourrions aussi utiliser des caractéristiques de la richesse sémantique (Pexman *et al.*, 2008) comme l'imageabilité (Balota *et al.*, 2004), l'interaction corps-objet (Siakaluk *et al.*, 2008), l'âge d'acquisition (Kuperman *et al.*, 2012) et l'incarnation (Sidhu *et al.*, 2014, 2016). Ceci nous permettrait de savoir si d'autres éléments que la catégorie sémantique influencent les modulations de la force de préhension et aussi de comparer nos résultats avec des tâches linguistiques fréquemment utilisées comme une tâche de décision lexicale ou de prononciation. Ce type d'analyse statistique très utilisé en linguistique pourrait aussi vérifier s'il y a un effet de fatigue, un effet par les mots présentés (dans l'expérience 2B, 5 mots dans une banque de 7 étaient choisis par catégorie). Un autre avantage est que nous pouvons inclure l'effet des participants, ce qui était un problème mentionné dans le cadre théorique de ce travail avec l'utilisation des analyses de groupes dans des tests de variances lorsque notre population est hétérogène comme le TDL. Si ces effets sont intéressants à vérifier avec nos données, notre nombre de participants était insuffisant, ce qui aurait amené un risque important d'avoir une erreur de l'alpha (Mcneish et Stapleton, 2016). Les auteurs recommandent un minimum de 30 participants. Ensuite, il n'est pas clair si nos données s'appliquaient vraiment à un modèle mixte, car nos données étaient en continu et un découpage était effectué pour diminuer la possibilité d'avoir un faux positif si nous analysions plus de 800 points de données par participant

avec des analyses de variances. Nous prenons donc un modèle à mesure répétée, mais ce n'est pas exactement une mesure répétée et c'est pour cette raison que nous n'appliquons pas de correction supplémentaire lors des analyses post hoc. Cela demanderait une plus mûre réflexion, même si ce modèle est intéressant.

Finalement, pour revenir sur les impacts d'une possible intervention clinique et pédagogique, il faut auparavant envisager les prochaines étapes de la recherche sur les différentes parties de ce projet. Premièrement, même s'il s'est révélé très intéressant de vérifier les liens entre la motricité et le langage chez les adultes et les adolescents, il faut être capable de comprendre comment ce lien se forme à l'enfance et différencier, lorsqu'ils sont jeunes, si le lien se forme normalement ou non, car l'intervention en orthophonie commence le plus souvent à un jeune âge, après l'entrée à l'école. Un projet avec une population importante (N=50 à 100) de jeunes ayant entre 5 et 11 ans, jumelant des analyses individuelles avec des analyses de groupes, pourrait ainsi constituer une base de données généralisables avec laquelle nous pourrions comparer des populations avec des troubles comme le TDL. Ainsi, il serait possible de distinguer à un jeune âge le développement normal du développement anormal du réseau de la motricité et du langage. Cela permettrait d'ajuster les interventions cliniques et pédagogiques quand elles risquent d'avoir le plus d'effets positifs. Bien sûr, l'efficacité de l'inclusion du mouvement dans les interventions cliniques et pédagogiques devra être vérifiée en recherche clinique ou en milieu d'enseignement. Par la suite, outre le fait d'augmenter la taille des échantillons, d'autres ajustements méthodologiques pourraient être inclus pour mieux comprendre les résultats dans la reproduction des trois expérimentations de ce projet. Premièrement, il serait intéressant de ne pas seulement vérifier si le participant connaît bien le stimulus présenté, mais collecter des données sur la manière dont il explique, reproduit ou mime le mot. Il serait possible de voir des groupes de réponses similaires et d'établir des liens avec la réponse motrice. Deuxièmement, avoir un indice linguistique de l'incarnation du mot dans le corps pour

établir des corrélations avec les modulations de la force nous permettrait de vérifier s'il existe des liens entre l'affordance des mots et la réponse motrice. Un tel indice a été présenté par Sidhu et al. (2014, 2016), mais il n'y a pas de banque de mots en français avec cet indice de caractéristiques sémantiques. En plus d'avoir la moyenne de cet indice, il faudrait aussi obtenir la valeur de cet indice pour chaque participant. Il serait intéressant de déterminer si la modulation varie en fonction de la valeur donnée par les individus pour les différents mots. Nous pourrions vérifier s'il existe un lien entre la perception motrice du mot et la réponse motrice lors du traitement du mot. Tout cela pourrait avoir un impact autant sur la préparation des protocoles de nouveaux projets de recherche que sur la planification d'une séance avec un jeune TDL. Par exemple, l'intervenant, au lieu de préparer une image d'un sentier dans la forêt avec du texte pour apprendre ce mot, prépare ses mimiques d'actions telles que marcher avec des bâtons de marche en sentier pour que l'enfant l'imité.

ANNEXE A

LISTES DE MOTS (STIMULI)

Tableau 4.4 Liste des mots de non-action (noms)

Mots	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
château	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
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

Tableau 4.5 Liste de mots d'action (verbes)

Mots	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
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

Légende : * Mots sélectionnés pour l'expérimentation 1A et 1B. ** Mots sélectionnés pour l'expérimentation 2.

ANNEXE B

RÉSULTATS EXPÉRIMENTATION 1B

Tableau 4.6 Sphéricité ANOVAS intraconditions pour le groupe contrôle

Participants	Conditions	Chi	Degrés de liberté	Valeur de P	Greenhouse-Geisser	Huynh-Feldt
1	M-A-D	-	-	-	-	-
	M-A-G	-	-	-	-	-
	M-NA-D	-	-	-	-	-
	M-NA-G	38,915	5	0,000	0,727	-
2	M-A-D	65,824	5	0,000	0,630	-
	M-A-G	114,210	5	0,000	0,491	-
	M-NA-D	83,685	5	0,000	0,527	-
	M-NA-G	101,552	5	0,000	0,545	-
3	M-A-D	63,250	5	0,000	0,601	-
	M-A-G	77,251	5	0,000	0,590	-
	M-NA-D	117,347	5	0,000	0,451	-
	M-NA-G	31,403	5	0,000	0,739	-
4	M-A-D	25,869	5	0,000	0,749969	-
	M-A-G	67,392	5	0,000	0,606	-
	M-NA-D	28,594	5	0,000	0,751	0,787
	M-NA-G	34,116	5	0,000	0,744	-
5	M-A-D	-	-	-	-	-

	M-A-G	74,683	5	0,000	0,528	-
	M-NA-D	-	-	-	-	-
	M-NA-G	26,925	5	0,000	0,709	-
6	M-A-D	59,189	5	0,000	0,649	-
	M-A-G	61,770	5	0,000	0,631	-
	M-NA-D	100,526	5	0,000	0,516	-
	M-NA-G	80,571	5	0,000	0,553	-
7	M-A-D	49,050	5	0,000	0,631	-
	M-A-G	55,856	5	0,000	0,634	-
	M-NA-D	48,215	5	0,000	0,663	-
	M-NA-G	50,445	5	0,000	0,653	-
8	M-A-D	11,446	5	0,043	0,880	0,943
	M-A-G	4,248	5	0,514	-	-
	M-NA-D	12,574	5	0,028	0,818	0,877
	M-NA-G	14,341	5	0,014	0,871	0,923
9	M-A-D	63,545	5	0,000	0,614	-
	M-A-G	44,797	5	0,000	0,646	-
	M-NA-D	76,169	5	0,000	0,646	-
	M-NA-G	58,003	5	0,000	0,691	-
10	M-A-D	30,797	5	0,000	0,770	0,810
	M-A-G	29,856	5	0,000	0,796	0,837
	M-NA-D	56,344	5	0,000	0,708	-
	M-NA-G	61,372	5	0,000	0,648	-
11	M-A-D	-	-	-	-	-
	M-A-G	-	-	-	-	-
	M-NA-D	37,01	5	0,000	0,624	-
	M-NA-G	-	-	-	-	-
12	M-A-D	52,894	5	0,000	0,656	-

	M-A-G	66,844	5	0,000	0,581	-
	M-NA-D	59,824	5	0,000	0,602	-
	M-NA-G	36,354	5	0,000	0,674	-
13	M-A-D	85,194	5	0,000	0,506	-
	M-A-G	-	-	-	-	-
	M-NA-D	76,150	5	0,000	0,537	-
	M-NA-G	52,059	5	0,0001	0,556	-
14	M-A-D	96,764	5	0,000	0,573	-
	M-A-G	76,249	5	0,000	0,607	-
	M-NA-D	61,648	5	0,000	0,646	-
	M-NA-G	78,079	5	0,000	0,539	-

Tableau 4.7 Résultats des ANOVAS intracondition du groupe contrôle

Participants	Conditions	Degrés de liberté	Degrés de liberté de l'erreur	Valeur F	Valeur de P	Éta carré partiel
1	M-A-D	-	-	-	-	-
	M-A-G	-	-	-	-	-
	M-NA-D	-	-	-	-	-
	M-NA-G	2,180	91,571	18,103	0,0001	0,301
2	M-A-D	1,890	100,178	12,878	0,000	0,195
	M-A-G	1,473	75,145	7,613	0,003	0,130
	M-NA-D	1,580	83,732	3,568	0,043	0,063
	M-NA-G	1,636	81,775	2,157	0,131	0,041
3	M-A-D	1,802	90,112	13,615	0,000	0,214
	M-A-G	1,771	90,340	6,839	0,003	0,118
	M-NA-D	1,354	69,042	1,027	0,337	0,020
	M-NA-G	2,217	,113,079	1,251	0,292	0,024

4	M-A-D	2,250	119,245	4,794	0,008	0,083
	M-A-G	1,818	96,332	16,062	0,000	0,233
	M-NA-D	2,36	122,776	2,215	0,104	0,041
	M-NA-G	2,231	118,242	5,292	0,005	0,091
5	M-A-D	-	-	-	-	-
	M-A-G	1,585	69,757	5,382	0,011	0,109
	M-NA-D	-	-	-	-	-
	M-NA-G	2,128	87,261	3,452	0,033	0,078
6	M-A-D	1,947	103,203	27,960	0,000	0,345
	M-A-G	1,892	100,292	28,305	0,000	0,348
	M-NA-D	1,548	82,066	18,643	0,000	0,260
	M-NA-G	1,658	87,849	31,314	0,000	0,371
7	M-A-D	1,892	100,280	20,289	0,000	0,277
	M-A-G	1,903	97,075	40,197	0,000	0,441
	M-NA-D	1,988	105,366	18,504	0,000	0,259
	M-NA-G	1,959	101,869	27,736	0,000	0,348
8	M-A-D	2,828	121,603	21,661	0,000	0,335
	M-A-G	3,000	144,000	8,035	0,000	0,143
	M-NA-D	2,632	102,665	12,193	0,000	0,238
	M-NA-G	2,769	138,451	6,536	0,001	0,116
9	M-A-D	1,841	97,585	16,267	0,000	0,235
	M-A-G	1,938	96,902	11,835	0,000	0,191
	M-NA-D	1,938	100,775	18,359	0,000	0,261
	M-NA-G	2,073	105,747	8,736	0,000	0,146
10	M-A-D	2,431	119,106	13,737	0,000	0,219
	M-A-G	2,512	130,633	8,148	0,000	0,135
	M-NA-D	2,125	104,131	8,912	0,000	0,154
	M-NA-G	1,944	103,045	7,758	0,001	0,128

11	M-A-D	-	-	-	-	-
	M-A-G	-	-	-	-	-
	M-NA-D	1,873	82,399	10,768	0,0001	0,197
	M-NA-G	-	-	-	-	-
12	M-A-D	1,969	98,452	7,643	0,001	0,133
	M-A-G	1,742	90,583	1,549	0,220	0,029
	M-NA-D	1,806	88,495	4,449	0,017	0,083
	M-NA-G	2,022	99,061	10,085	0,000	0,171
13	M-A-D	1,517	74,316	4,841	0,018	0,090
	M-A-G	-	-	-	-	-
	M-NA-D	1,612	77,396	3,024	0,065	0,059
	M-NA-G	1,668	65,044	12,401	0,0001	0,241
14	M-A-D	1,718	91,048	16,844	0,000	0,241
	M-A-G	1,820	96,471	19,000	0,000	0,264
	M-NA-D	1,939	102,780	16,319	0,000	0,235
	M-NA-G	1,618	85,745	2,169	0,130	0,039

Tableau 4.8 Résultats post hoc LSD entre les MF poststimuli (en trois fenêtres) et la force préstimuli du groupe contrôle.

Participants	Conditions	Fenêtre de temps (ms)	Différence des moyennes	Erreur standard	Valeur de p
1	M-A-D	100-300	-	-	-
		300-500	-	-	-
		500-800	-	-	-
	M-A-G	100-300	-	-	-
		300-500	-	-	-
		500-800	-	-	-
	M-NA-D	100-300	-	-	-
		300-500	-	-	-

		500-800	-	-	-
	M-NA-G	100-300	-0,01	0,006	0,129
		300-500	-,028*	0,007	0,0001
		500-800	-,041*	0,008	0,0001
2	M-A-D	100-300	0,001	0,003	0,837
		300-500	-,012*	0,005	0,016
		500-800	-,022*	0,006	0,0001
	M-A-G	100-300	0,002	0,004	0,684
		300-500	-0,012	0,006	0,056
		500-800	-,020*	0,008	0,013
	M-NA-D	100-300	,009*	0,003	0,002
		300-500	9,01E-05	0,004	0,982
		500-800	-0,003	0,006	0,542
	M-NA-G	100-300	-	-	-
		300-500	-	-	-
		500-800	-	-	-
3	M-A-D	100-300	-,009*	0,003	0,001
		300-500	-,018*	0,004	0,0001
		500-800	-,019*	0,005	0,0001
	M-A-G	100-300	-0,007	0,003	0,054
		300-500	-,013*	0,004	0,003
		500-800	-,013*	0,005	0,006
	M-NA-D	100-300	-	-	-
		300-500	-	-	-
		500-800	-	-	-
	M-NA-G	100-300	-	-	-
		300-500	-	-	-
		500-800	-	-	-
4	M-A-D	100-300	0,001	0,002	0,597
		300-500	-0,003	0,003	0,257
		500-800	-,008*	0,003	0,015
		100-300	0,002	0,002	0,356

	M-A-G	300-500	-0,006	0,003	0,053
		500-800	-,016*	0,004	0,0001
	M-NA-D	100-300	-	-	-
		300-500	-	-	-
		500-800	-	-	-
	M-NA-G	100-300	0,001	0,002	0,546
		300-500	-0,003	0,002	0,209
		500-800	-,007*	0,003	0,019
	5	M-A-D	100-300	-	-
300-500			-	-	-
500-800			-	-	-
M-A-G		100-300	-,011*	0,005	0,048
		300-500	-,019*	0,007	0,011
		500-800	-,023*	0,009	0,013
M-NA-D		100-300	-	-	-
		300-500	-	-	-
		500-800	-	-	-
M-NA-G		100-300	-0,006	0,005	0,193
		300-500	-,016*	0,005	0,002
		500-800	-0,013	0,007	0,082
6	M-A-D	100-300	-,007*	0,003	0,013
		300-500	-,017*	0,003	0,0001
		500-800	-,022*	0,004	0,0001
	M-A-G	100-300	-0,005	0,003	0,131
		300-500	-,022*	0,004	0,0001
		500-800	-,027*	0,005	0,0001
	M-NA-D	100-300	-0,004	0,003	0,184
		300-500	-,018*	0,004	0,0001
		500-800	-,024*	0,005	0,0001
	M-NA-G	100-300	-,009*	0,003	0,011
		300-500	-,025*	0,005	0,0001
		500-800	-,033*	0,005	0,0001

7	M-A-D	100-300	6,46E-05	0,004	0,987
		300-500	-,012*	0,005	0,013
		500-800	-,026*	0,005	0,0001
	M-A-G	100-300	-0,001	0,002	0,747
		300-500	-,019*	0,004	0,0001
		500-800	-,031*	0,004	0,0001
	M-NA-D	100-300	0,001	0,003	0,671
		300-500	-,010*	0,004	0,014
		500-800	-,022*	0,005	0,0001
	M-NA-G	100-300	-0,002	0,003	0,504
		300-500	-,016*	0,004	0,001
		500-800	-,033*	0,005	0,0001
8	M-A-D	100-300	-0,001	0,006	0,852
		300-500	-,017*	0,006	0,005
		500-800	-,039*	0,006	0,0001
	M-A-G	100-300	0,008	0,004	0,050374
		300-500	0,004	0,004	0,329
		500-800	-,011*	0,004	0,01
	M-NA-D	100-300	5,23E-05	0,005	0,991
		300-500	-,022*	0,006	0,001
		500-800	-,024*	0,006	0,001
	M-NA-G	100-300	0,007	0,004	0,073
		300-500	-0,004	0,004	0,383
		500-800	-,009*	0,004	0,013
9	M-A-D	100-300	-0,006	0,004	0,1
		300-500	-,017*	0,005	0,001
		500-800	-,028*	0,006	0,0001
	M-A-G	100-300	-,011*	0,004	0,011
		300-500	-,021*	0,006	0,001
		500-800	-,024*	0,005	0,0001
	M-NA-D	100-300	-0,002	0,004	0,569
		300-500	-,014*	0,005	0,01

		500-800	-,029*	0,006	0,0001
	M-NA-G	100-300	-0,002	0,004	0,676
		300-500	-,015*	0,005	0,007
		500-800	-,018*	0,005	0,001
10	M-A-D	100-300	-0,007	0,004	0,08
		300-500	-,023*	0,005	0,0001
		500-800	-,022*	0,005	0,0001
	M-A-G	100-300	-0,003	0,003	0,335
		300-500	-,012*	0,003	0,0001
		500-800	-,010*	0,003	0,002
	M-NA-D	100-300	-0,004	0,005	0,437
		300-500	-,018*	0,006	0,003
		500-800	-,022*	0,006	0,001
	M-NA-G	100-300	-,008*	0,003	0,014
		300-500	-,017*	0,004	0,0001
		500-800	-,014*	0,005	0,006
11	M-A-D	100-300	-	-	-
		300-500	-	-	-
		500-800	-	-	-
	M-A-G	100-300	-	-	-
		300-500	-	-	-
		500-800	-	-	-
	M-NA-D	100-300	-0,002	0,004	0,602
		300-500	-,018*	0,005	0,002
		500-800	-,025*	0,007	0,001
	M-NA-G	100-300	-	-	-
		300-500	-	-	-
		500-800	-	-	-
12	M-A-D	100-300	-0,001	0,003	0,698
		300-500	-0,009	0,005	0,066
		500-800	-,016*	0,005	0,001
		100-300	-	-	-

	M-A-G	300-500	-	-	-
		500-800	-	-	-
	M-NA-D	100-300	-0,001	0,004	0,884
		300-500	-0,007	0,004	0,126
		500-800	-,015*	0,006	0,022
	M-NA-G	100-300	0	0,003	0,944
		300-500	-,010*	0,004	0,009
		500-800	-,017*	0,005	0,002
	13	M-A-D	100-300	-0,007	0,005
300-500			-,014*	0,006	0,02
500-800			-,017*	0,007	0,021
M-A-G		100-300	-	-	-
		300-500	-	-	-
		500-800	-	-	-
M-NA-D		100-300	-	-	-
		300-500	-	-	-
		500-800	-	-	-
M-NA-G		100-300	-,015*	0,005	0,006
		300-500	-,028*	0,007	0,0001
		500-800	-,029*	0,007	0,0001
14	M-A-D	100-300	0,002	0,002	0,397
		300-500	-0,003	0,002	0,283
		500-800	-,012*	0,003	0,0001
	M-A-G	100-300	0,002	0,001	0,116
		300-500	-,002*	0,001	0,044
		500-800	-,006*	0,002	0,0001
	M-NA-D	100-300	0,002	0,002	0,322
		300-500	-0,004	0,003	0,108
		500-800	-,012*	0,003	0,0001
	M-NA-G	100-300	-	-	-
		300-500	-	-	-
		500-800	-	-	-

Tableau 4.9 Résultats des ANOVAS intercondition par participant du groupe contrôle.

Participants	Mains	Effets et interaction	Degrés de liberté	Degrés de liberté de l'erreur	Valeur de F	Valeur de P	Éta carré partiel
2	Gauche	Occurrence	1	101	7,501	0,007	0,69
		Mot	1	101	2,491	0,118	0,24
		Occurrence/mot	1	-	0,164	0,686	0,002
	Droite	Occurrence	1	106	9,495	0,003	0,082
		Mot	1	106	4,836	0,03	0,044
		Occurrence/mot	1	-	2,106	0,150	0,019
3	Gauche	Occurrence	1	102	1,247	0,267	0,12
		Mot	1	102	8,886	0,004	0,08
		Occurrence/mot	1	-	1,874	0,174	0,018
	Droite	Occurrence	1	101	0,038	0,846	0,000
		Mot	1	101	10,832	0,001	0,097
		Occurrence/mot	1	-	0,500	0,481	0,005
4	Gauche	Occurrence	1	106	20,240	0,001	0,160
		Mot	1	106	2,319	0,131	0,021
		Occurrence/mot	1	-	4,800	0,031	0,043
	Droite	Occurrence	1	105	5,843	0,017	0,053
		Mot	1	105	0,706	0,403	0,007
		Occurrence/mot	1	-	0,876	0,351	0,008
5	Gauche	Occurrence	1	85	0,002	0,963	0,000
		Mot	1	85	0,424	0,522	0,005
		Occurrence/mot	1	-	1,368	0,246	0,016
		Occurrence	1	106	12,159	0,001	0,103

6	Gauche	Mot	1	106	0,612	0,436	0,006
		Occurrence/ mot	1	-	0,562	0,455	0,005
	Droite	Occurrence	1	106	10,855	0,001	0,093
		Mot	1	106	0,047	0,829	0,000
		Occurrence/ mot	1	-	0,195	0,660	0,002
7	Gauche	Occurrence	1	103	47,926	0,001	0,318
		Mot	1	103	0,011	0,917	0,000
		Occurrence/ mot	1	-	1,275	0,261	0,012
	Droite	Occurrence	1	106	36,908	0,001	0,258
		Mot	1	106	0,284	0,595	0,003
		Occurrence/ mot	1	-	0,056	0,813	0,001
8	Gauche	Occurrence	1	98	16,788	0,001	0,146
		Mot	1	98	0,398	0,529	0,004
		Occurrence/ mot	1	-	3,649	0,059	0,036
	Droite	Occurrence	1	82	13,551	0,001	0,142
		Mot	1	82	0,433	0,513	0,005
		Occurrence/ mot	1	-	10,142	0,002	0,110
9	Gauche	Occurrence	1	101	1,734	0,191	0,017
		Mot	1	101	0,666	0,416	0,007
		Occurrence/ mot	1	-	0,006	0,938	0,000
	Droite	Occurrence	1	105	40,019	0,001	0,276
		Mot	1	105	0,014	0,908	0,000
		Occurrence/ mot	1	-	1,215	0,273	0,011
10	Gauche	Occurrence	1	105	1,968	0,164	0,018
		Mot	1	105	0,742	0,391	0,007
		Occurrence/ mot	1	-	0,151	0,699	0,699
		Occurrence	1	98	0,347	0,557	0,004

	Droite	Mot	1	98	0,133	0,716	0,001
		Occurrence/ mot	1	-	0,844	0,361	0,009
12	Gauche	Occurrence	1	101	2,702	0,103	0,026
		Mot	1	101	3,835	0,053	0,037
		Occurrence/ mot	1	-	3,175	0,078	0,030
	Droite	Occurrence	1	99	8,632	0,004	0,080
		Mot	1	99	0,074	0,786	0,001
		Occurrence/ mot	1	-	0,085	0,771	0,001
13	Droite	Occurrence	1	97	0,355	0,553	0,004
		Mot	1	97	0,306	0,581	0,003
		Occurrence/ mot	1	-	0,630	0,429	0,006
14	Gauche	Occurrence	1	106	8,589	0,004	0,075
		Mot	1	106	2,166	0,144	0,020
		Occurrence/ mot	1	-	3,713	0,057	0,034
	Droite	Occurrence	1	106	78,346	0,001	0,425
		Mot	1	106	0,074	0,786	0,001
		Occurrence/ mot	1	-	0,921	0,339	0,009

ANNEXE C

RÉSULTATS EXPÉRIMENTATION 2

Tableau 4.10 Résultats des tests des rangs signés Wilcoxon entre les résultats des répondants au questionnaire CCC-2 (z-score)

Composantes du CCC-2	Phonologie et fluence	Morphosyntaxe	Sémantique	Cohérence	Initiation	Langage Stéréotypé	Utilisation du contexte	Communication non verbale	Relations sociales	Intérêts
Adolescent et parent	0,992	0,604	* 2,140	** 2,603	1,761	1,878	1,842	-0,158	-0,052	* 2,557
Adolescent et intervenant	0,205	-1,077	1,247	1,248	-0,267	0,197	-0,476	-0,300	0,509	1,826
Parent et intervenant	-0,624	-1,505	0,456	-0,760	-0,891	-1,027	-1,900	-0,269	-0,040	* -2,006

Légende : * : valeur de P inférieur à 0,05 ; ** : valeur de P inférieur à 0,01

Tableau 4.11 Sphéricité pour chaque ANOVA du groupe trouble de langage

Participants	Conditions	Chi	Degrés de liberté	Valeur de P	Greenhouse-Geisser	Huynh-Feldt
1	M-A-D	-	-	-	-	-
	M-A-G	-	-	-	-	-
	M-NA-D	45,914	5	0,0001	0,595	-
	M-NA-G	-	-	-	-	-
3	M-A-D	49,73	5	0,0001	0,596	-
	M-A-G	77,14	5	0,0001	0,483	-
	M-NA-D	100,318	5	0,0001	0,501	-
	M-NA-G	79,902	5	0,0001	0,606	-
5	M-A-D	73,431	5	0,0001	0,608	-
	M-A-G	75,186	5	0,0001	0,605	-
	M-NA-D	80,906	5	0,0001	0,603	-
	M-NA-G	48,878	5	0,0001	0,708	-
6	M-A-D	51,747	5	0,0001	0,633	-
	M-A-G	35,953	5	0,0001	0,68	-
	M-NA-D	107,297	5	0,0001	0,576	-
	M-NA-G	72,029	5	0,0001	0,597	-
7	M-A-D	48,392	5	0,0001	0,564	-
	M-A-G	-	-	-	-	-
	M-NA-D	74,564	5	0,0001	0,644	-
	M-NA-G	60,527	5	0,0001	0,578	-
8	M-A-D	75,875	5	0,0001	0,557	-
	M-A-G	41,981	5	0,0001	0,658	-
	M-NA-D	32,752	5	0,0001	0,746	-
	M-NA-G	73,615	5	0,0001	0,531	-
9	M-A-D	50,861	5	0,0001	0,655	-

	M-A-G	31,391	5	0,0001	0,785	0,829
	M-NA-D	35,315	5	0,0001	0,738	-
	M-NA-G	32,522	5	0,0001	0,775	0,813
11	M-A-D	64,537	5	0,0001	0,57	-
	M-A-G	-	-	-	-	-
	M-NA-D	35,6	5	0,0001	0,717	-
	M-NA-G	-	-	-	-	-
12	M-A-D	60,817	5	0,0001	0,592	-
	M-A-G	55,525	5	0,0001	0,619	-
	M-NA-D	36,525	5	0,0001	0,668	-
	M-NA-G	92,203	5	0,0001	0,516	-
13	M-A-D	49,048	5	0,0001	0,604	-
	M-A-G	78,6	5	0,0001	0,524	-
	M-NA-D	77,837	5	0,0001	0,564	-
	M-NA-G	80,212	5	0,0001	0,507	-

Tableau 4.12 Résultats des ANOVAS intracondition du groupe trouble de langage

Participants	Conditions	Degrés de liberté	Degrés de liberté de l'erreur	Valeur F	Valeur de P	Éta carré partiel
1	M-A-D	-	-	-	-	-
	M-A-G	-	-	-	-	-
	M-NA-D	1,784	74,942	3,479	0,041	0,76
	M-NA-G	-	-	-	-	-
3	M-A-D	1,788	69,74	8,643	0,01	0,181
	M-A-G	1,449	60,843	0,824	0,409	0,19
	M-NA-D	1,504	75,213	3,947	0,034	0,73
	M-NA-G	1,817	87,225	3,282	0,047	0,064

5	M-A-D	1,825	91,228	7,553	0,01	0,131
	M-A-G	1,815	94,396	0,662	0,504	0,013
	M-NA-D	1,809	90,461	2,107	0,132	0,4
	M-NA-G	2,124	108,317	0,5	0,619	0,01
6	M-A-D	1,9	96,913	0,518	0,588	0,01
	M-A-G	2,041	104,114	2,183	0,117	0,041
	M-NA-D	1,727	88,1	1,114	0,326	0,021
	M-NA-G	1,79	91,28	4,194	0,022	0,076
7	M-A-D	1692	66,002	4,152	0,026	0,096
	M-A-G	-	-	-	-	-
	M-NA-D	1,932	79,202	7,812	0,001	0,16
	M-NA-G	1,733	71,045	2,008	0,148	0,047
8	M-A-D	1,671	76,873	6,234	0,005	0,119
	M-A-G	1,973	100,617	1,462	0,237	0,028
	M-NA-D	2,238	102,956	15,254	0,0001	0,249
	M-NA-G	1,593	73,261	3,192	0,058	0,065
9	M-A-D	1,966	104,194	0,355	0,698	0,007
	M-A-G	2,487	119,355	3,588	0,022	0,07
	M-NA-D	2,213	117,264	1,308	0,275	0,024
	M-NA-G	2,438	129,215	0,524	0,629	0,01
11	M-A-D	1,71	70,107	8,817	0,001	0,177
	M-A-G	-	-	-	-	-
	M-NA-D	2,152	90,391	14,618	0,0001	0,258
	M-NA-G	-	-	-	-	-
12	M-A-D	1,777	83,509	18,294	0,0001	0,28
	M-A-G	1,858	98,45	6,058	0,004	0,103
	M-NA-D	2,003	98,161	18,395	0,0001	0,273
	M-NA-G	1,548	80,492	9,448	0,001	0,154

13	M-A-D	1,811	85,133	0,862	0,416	0,018
	M-A-G	1,573	75,497	1,16	0,309	0,024
	M-NA-D	1,692	81,211	0,156	0,82	0,003
	M-NA-G	1,521	62,35	3,669	0,043	0,082

Tableau 4.13 Résultats post hoc LSD entre les MF poststimuli (en trois fenêtres) et la force préstimuli du groupe trouble de langage

Participants	Conditions	Fenêtre de temps (ms)	Différence des moyennes	Erreur standard	Valeur de p
1	M-A-D	100-300	-	-	-
		300-500	-	-	-
		500-800	-	-	-
	M-A-G	100-300	-	-	-
		300-500	-	-	-
		500-800	-	-	-
	M-NA-D	100-300	0,004	0,004	0,398
		300-500	-0,002	0,006	0,747
		500-800	-0,014	0,008	0,083
	M-NA-G	100-300	-	-	-
		300-500	-	-	-
		500-800	-	-	-
3	M-A-D	100-300	-0,005	0,006	0,451
		300-500	-,018*	0,009	0,043
		500-800	-,033*	0,01	0,001
	M-A-G	100-300	-	-	-
		300-500	-	-	-
		500-800	-	-	-
	M-NA-D	100-300	-0,001	0,003	0,706
		300-500	-,010*	0,005	0,038
		500-800	-0,014	0,007	0,052

	M-NA-G	100-300	-0,001	0,004	0,726
		300-500	-0,003	0,004	0,471
		500-800	0,009	0,006	0,121
5	M-A-D	100-300	,009*	0,004	0,043
		300-500	,011*	0,005	0,032
		500-800	,019*	0,005	0,001
	M-A-G	100-300	-	-	-
		300-500	-	-	-
		500-800	-	-	-
	M-NA-D	100-300	-	-	-
		300-500	-	-	-
		500-800	-	-	-
	M-NA-G	100-300	-	-	-
		300-500	-	-	-
		500-800	-	-	-
6	M-A-D	100-300	-	-	-
		300-500	-	-	-
		500-800	-	-	-
	M-A-G	100-300	-	-	-
		300-500	-	-	-
		500-800	-	-	-
	M-NA-D	100-300	-	-	-
		300-500	-	-	-
		500-800	-	-	-
	M-NA-G	100-300	0,006	0,005	0,269
		300-500	0,0002	0,006	0,976
		500-800	-0,011	0,006	0,083
7	M-A-D	100-300	-0,005	0,005	0,328
		300-500	-0,008	0,007	0,289
		500-800	-,021*	0,008	0,018
	M-A-G	100-300	-	-	-
		300-500	-	-	-

		500-800	-	-	-
	M-NA-D	100-300	,015*	0,006	0,02
		300-500	0,006	0,006	0,365
		500-800	-0,01	0,006	0,134
	M-NA-G	100-300	-	-	-
		300-500	-	-	-
		500-800	-	-	-
8	M-A-D	100-300	-0,008	0,005	0,148
		300-500	-,018*	0,007	0,011
		500-800	-,024*	0,009	0,008
	M-A-G	100-300	-	-	-
		300-500	-	-	-
		500-800	-	-	-
	M-NA-D	100-300	0	0,004	0,981
		300-500	-0,01	0,005	0,053
		500-800	-,029*	0,006	0,0001
M-NA-G	100-300	-	-	-	
	300-500	-	-	-	
	500-800	-	-	-	
9	M-A-D	100-300	-	-	-
		300-500	-	-	-
		500-800	-	-	-
	M-A-G	100-300	-0,002	0,003	0,554
		300-500	-0,007	0,003	0,063
		500-800	-,009*	0,003	0,009
	M-NA-D	100-300	-	-	-
		300-500	-	-	-
		500-800	-	-	-
M-NA-G	100-300	-	-	-	
	300-500	-	-	-	
	500-800	-	-	-	
		100-300	0,002	0,005	0,665

11	M-A-D	300-500	-0,002	0,006	0,785
		500-800	-,022*	0,008	0,006
	M-A-G	100-300	-	-	-
		300-500	-	-	-
		500-800	-	-	-
	M-NA-D	100-300	-0,002	0,006	0,747
		300-500	-,014*	0,006	0,014
		500-800	-,032*	0,007	0,0001
	M-NA-G	100-300	-	-	-
300-500		-	-	-	
500-800		-	-	-	
12	M-A-D	100-300	-,009*	0,004	0,031
		300-500	-,026*	0,005	0,0001
		500-800	-,024*	0,005	0,0001
	M-A-G	100-300	-0,003	0,003	0,27
		300-500	-,012*	0,003	0,001
		500-800	-0,004	0,004	0,308
	M-NA-D	100-300	-,008*	0,003	0,003
		300-500	-,022*	0,004	0,0001
		500-800	-,017*	0,004	0,0001
	M-NA-G	100-300	-,004*	0,001	0,003
		300-500	-,011*	0,002	0,001
		500-800	-,007*	0,003	0,035
13	M-A-D	100-300	-	-	-
		300-500	-	-	-
		500-800	-	-	-
	M-A-G	100-300	-	-	-
		300-500	-	-	-
		500-800	-	-	-
	M-NA-D	100-300	-	-	-
		300-500	-	-	-
		500-800	-	-	-

	M-NA-G	100-300	0,007	0,004	0,073
		300-500	0,012	0,006	0,051
		500-800	,017*	0,008	0,035

APPENDICE A

FICHE DES PARTICIPANTS (EXPÉRIMENTATION 1A ET 1B)

Feuille d'identification pour l'expérimentation EEG/GFS.

Sujet # :

Prénom : _____

Date de naissance : _____

Date de test : _____

Âge : _____

Sexe : _____

Pourcentage de prévalence manuelle : _____%

*voir test Edinburgh

Bloc de stimuli

Liste 1 : SENTIER 5N Nombre de mots cibles comptés : _____

Liste 2 : PRENDRE 1V Nombre de mots cibles comptés : _____

Liste 3 : ÉTOILE 4N Nombre de mots cibles comptés : _____

Liste 4 : AVION 3N Nombre de mots cibles comptés : _____

- Liste 5 : MONTRER 2V Nombre de mots cibles comptés : _____
- Liste 6 : SERRER 5V Nombre de mots cibles comptés : _____
- Liste 7 : CHAMBRE 1N Nombre de mots cibles comptés : _____
- Liste 8 : FRAPPER 4V Nombre de mots cibles comptés : _____
- Liste 9 : JETER 3V Nombre de mots cibles comptés : _____
- Liste 10 : TERRAIN 2N Nombre de mots cibles comptés : _____

Section multilinguisme.

Langue maternelle : _____

Langue parlée à la maison : _____

Langue d'enseignement : _____

Langue utilisée dans un contexte social : _____

Question : Si vous avez un accident automobile et que vous perdez toutes les langues que vous connaissez à l'exception d'une, laquelle choisirez-vous de conserver si vous avez le choix? _____

Commentaires sur la méthodologie :

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 = _____

APPENDICE B

FICHE DES PARTICIPANTS (EXPÉRIMENTATION 2)

Feuille d'identification pour l'expérimentation motricité/langage.

Sujet # :

Prénom : _____

Date de naissance : _____

Date de test : _____

Âge : _____

Sexe : _____

Pourcentage de prévalence manuelle : _____%

*voir test Edinburgh

Bloc de stimuli (10=2x, 11=2x, 12=1x par catégorie de mots)

Liste 1 : _____ Nombre de mots cibles comptés : _____

Liste 2 : _____ Nombre de mots cibles comptés : _____

Liste 3 : _____ Nombre de mots cibles comptés : _____

Liste 4 : _____ Nombre de mots cibles comptés : _____

Liste 5 : _____ Nombre de mots cibles comptés : _____

Liste 6 : _____ Nombre de mots cibles comptés : _____

Liste 7 : _____ Nombre de mots cibles comptés : _____

Liste 8 : _____ Nombre de mots cibles comptés : _____

Liste 9 : _____ Nombre de mots cibles comptés : _____

Liste 10 : _____ Nombre de mots cibles comptés : _____

Section multilinguisme, naissance et comorbidité.

Langue maternelle : _____

Langue(s) parlées à la maison : _____

Langue(s) utilisées dans un contexte social : _____

Fréquentation de l'école francophone depuis la 1^{re} année du primaire : Oui _____

Non _____

Autre diagnostic (comorbidité) _____

Naissance prématurée : Oui _____ Non _____

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 = _____

RÉFÉRENCES

- Adolf, J. K. et Fried, E. I. (2019, 2 avril). *Ergodicity is sufficient but not necessary for group-to-individual generalizability*. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 116(14), 6540-6541. National Academy of Sciences. <https://doi.org/10.1073/pnas.1818675116>
- Albaret, J. (2001). Les troubles psychomoteurs chez l'enfant. *Encyclopédie Médico-Chirurgicale*.
- American Psychiatric Association. (2013). *Diagnostic and statistical manual of mental disorders : DSM-5*. (5e éd.). American Psychiatric Association.
- American Psychiatric Association. (2022). *Diagnostic and Statistical Manual of Mental Disorders, Fifth Edition, Text Revision (DSM-5-TR)*. American Psychiatric Association Publishing.
- Aravena, P., Courson, M., Frak, V., Cheylus, A., Paulignan, Y., Deprez, V. et Nazir, T. a. (2014). Action relevance in linguistic context drives word-induced motor activity. *Frontiers in human neuroscience*, 8(April), 163. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2014.00163>
- Aravena, P., Delevoeye-Turrell, Y., Deprez, V., Cheylus, A., Paulignan, Y., Frak, V. et 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. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0050287>

Avenet, S., Lemaître, M. et Vallée, L. (2016). DSM5 : quels changements pour les troubles spécifiques du langage oral? *Neuropsychiatrie de l'enfance et de l'adolescence*, 64(2), 81-92. <https://doi.org/10.1016/j.neurenf.2015.12.002>

Baayen, R. H., Davidson, D. J. et Bates, D. M. (2008). Mixed-effects modeling with crossed random effects for subjects and items. *Journal of Memory and Language*, 59(4), 390-412. <https://doi.org/10.1016/j.jml.2007.12.005>

Badcock, N. A., Bishop, D. V. M., Hardiman, M. J., Barry, J. G. et Watkins, K. E. (2012). Co-localisation of abnormal brain structure and function in specific language impairment. *Brain and Language*, 120(3), 310-320. <https://doi.org/10.1016/j.bandl.2011.10.006>

Balota, D. A., Cortese, M. J., Sergent-Marshall, S. D., Spieler, D. H. et Yap, M. J. (2004). Visual word recognition of single-syllable words. *Journal of Experimental Psychology: General*, 133(2), 283-316. <https://doi.org/10.1037/0096-3445.133.2.283>

Barsalou, L. W. (1999). Perceptual symbol systems. *Behavioral and Brain Sciences*, 22(4), 577-660. <https://doi.org/10.1017/S0140525X99002149>

Bechtold, L., Ghio, M., Lange, J. et Bellebaum, C. (2018). Event-related desynchronization of mu and beta oscillations during the processing of novel tool names. *Brain and Language*, 177-178, 44-55. <https://doi.org/10.1016/j.bandl.2018.01.004>

- Begliomini, C., de Sanctis, T., Marangon, M., Tarantino, V., Sartori, L., Miotto, D., Motta, R., Stramare, R. et Castiello, U. (2014). An investigation of the neural circuits underlying reaching and reach-to-grasp movements: from planning to execution. *Frontiers in Human Neuroscience*, 8. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fnhum.2014.00676>
- Begliomini, C., Sartori, L., di Bono, M. G., Budisavljević, S. et Castiello, U. (2018). The Neural Correlates of Grasping in Left-Handers: When Handedness Does Not Matter. *Frontiers in Neuroscience*, 12. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fnins.2018.00192>
- Billard, C. (2007). Dépistage des troubles du langage oral chez l'enfant et leur classification. *Journal de Pédiatrie et de Puériculture*, 20(3-4), 152-156. <https://doi.org/10.1016/j.jpp.2007.04.008>
- Billard, C., Duvelleroy-Hommet, C., de Becque, B. et Gillet, P. (1996). Les dysphasies de développement. *Archives de Pédiatrie*, 3(6), 580-587. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0929693X96832325>
- Binder, J. R., Desai, R. H., Graves, W. W. et Conant, L. L. (2009). Where Is the Semantic System? A Critical Review and Meta-Analysis of 120 Functional Neuroimaging Studies. *Cerebral Cortex*, 19(12), 2767-2796. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhp055>
- Bishop, D. V. M. (2006). *Children's Communication Checklist-2 U.S. Edition (CCC—2)*. Pearson.
- Bishop, D. V. M. (2017). Why is it so hard to reach agreement on terminology? The case of developmental language disorder (DLD). *International Journal of*

Language and Communication Disorders, 52(6), 671-680.
<https://doi.org/10.1111/1460-6984.12335>

Blampain, J., Ott, L. et Delevoye-Turrell, Y. N. (2018). Seeing action simulation as it unfolds: The implicit effects of action scenes on muscle contraction evidenced through the use of a grip-force sensor. *Neuropsychologia*, 114(April), 231-242.
<https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2018.04.026>

Bonneau, D., Verny, C. et Uzé, J. (2004). Les facteurs génétiques dans les troubles spécifiques du langage oral. *Archives de Pédiatrie*, 11, 1213-6.
<https://doi.org/10.1016/j.arcped.2004.03.121>

Boulenger, V., Roy, A. C., Paulignan, Y., Deprez, V., Jeannerod, M. et 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.

Boulenger, V., Silber, B. Y., Roy, A. C., Paulignan, Y., Jeannerod, M. et Nazir, T. A. (2008). Subliminal display of action words interferes with motor planning: A combined EEG and kinematic study. *Journal of Physiology Paris*, 102(1-3), 130-136. <https://doi.org/10.1016/j.jphysparis.2008.03.015>

Bourbonnais, D., Frak, V., Pilon, J.-F. et Goyette, M. (2008). An instrumented cylinder measuring pinch force and orientation. *Journal of neuroengineering and rehabilitation*, 5, 2. <https://doi.org/10.1186/1743-0003-5-2>

Breault, C., Béliveau, M.-J., Labelle, F., Valade, F. et Trudeau, N. (2019). Le trouble développemental du langage (TDL) : mise à jour interdisciplinaire.

Neuropsychologie clinique et appliquée, 3(Fall 2019), 64-81.
<https://doi.org/10.46278/j.ncacn.20190717>

Broca, P. (1861). Perte de la parole, ramollissement chronique et destruction partielle du lobe antérieur gauche du cerveau. *Bull Soc Anthropol*, 2(1), 235-238.

Byiers, B. J., Reichle, J. et Symons, F. J. (2012). Single-subject experimental design for evidence-based practice. *American Journal of Speech-Language Pathology*, 21(4), 397-414. [https://doi.org/10.1044/1058-0360\(2012/11-0036\)](https://doi.org/10.1044/1058-0360(2012/11-0036))

Chiron, C., Pinton, F., Masure, M. C., Duvelleroy-Hommet, C., Leon, F. et Billard, C. (1999). Hemispheric specialization using SPECT and stimulation tasks in children with dysphasia and dystrophia. *Developmental Medicine & Child Neurology*, 41(8), 512-520. <https://doi.org/10.1017/S0012162299001139>

Collins, A. M. et Quillian, M. R. (1969). Retrieval time from semantic memory. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, 8(2), 240-247. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0022-5371\(69\)80069-1](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0022-5371(69)80069-1)

Cook, S. W., Mitchell, Z. et Goldin-Meadow, S. (2008). Gesturing makes learning last. *Cognition*, 106(2), 1047-1058. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2007.04.010>

da Silva, R. L., Labrecque, D., Caromano, F. A., Higgins, J. et Frak, V. (2018). Manual action verbs modulate the grip force of each hand in unimanual or symmetrical bimanual tasks. *PLoS ONE*, 13(2), 1-13. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0192320>

- Dam, W. O. van et Desai, R. H. (2016). The Semantics of Syntax : The Grounding of Transitive and Intransitive Constructions. *Journal of cognitive neuroscience*, 1-17. <https://doi.org/10.1162/jocn>
- de Guibert, C., Maumet, C., Jannin, P., Ferré, J.-C., Tréguier, C., Barillot, C., le Rumeur, E., Allaire, C. et Biraben, A. (2011). Abnormal functional lateralization and activity of language brain areas in typical specific language impairment (developmental dysphasia). *Brain*, 134, 3044-58. <https://doi.org/10.1093/brain/awr141>
- Dehaene, S. (1995). Electrophysiological evidence for category-specific word processing in the normal human brain. *NeuroReport*, 6(16). https://journals.lww.com/neuroreport/Fulltext/1995/11000/Electrophysiological_evidence_for.14.aspx
- Delorme, A. et Makeig, S. (2004). EEGLAB: an open source toolbox for analysis of single-trial EEG dynamics including independent component analysis. *Journal of neuroscience methods*, 134(1), 9-21. <https://doi.org/10.1016/J.JNEUMETH.2003.10.009>
- Desai, R. H., Binder, J. R., Conant, L. L., Mano, Q. R. et Seidenberg, M. S. (2011). The neural career of sensory-motor metaphors. *Journal of cognitive neuroscience*, 23(9), 2376-2386. <https://doi.org/10.1162/jocn.2010.21596>
- Dreyer, F. R. et Pulvermüller, F. (2018). Abstract semantics in the motor system? – An event-related fMRI study on passive reading of semantic word categories carrying abstract emotional and mental meaning. *Cortex*, 100, 52-70. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2017.10.021>

- Durand, E., Berroir, P. et Ansaldo, A. I. (2018). The Neural and Behavioral Correlates of Anomia Recovery following Personalized Observation, Execution, and Mental Imagery Therapy: A Proof of Concept. *Neural Plasticity*, 2018. <https://doi.org/10.1155/2018/5943759>
- Durand, E., Masson-Trottier, M., Sontheimer, A. et Ansaldo, A. I. (2021). Increased links between language and motor areas: A proof-of-concept study on resting-state functional connectivity following Personalized Observation, Execution and Mental imagery therapy in chronic aphasia. *Brain and Cognition*, 148(June 2020). <https://doi.org/10.1016/j.bandc.2020.105659>
- Eicher, J. D., Montgomery, A. M., Akshoomoff, N., Amaral, D. G., Bloss, C. S., Libiger, O., Schork, N. J., Darst, B. F., Casey, B. J., Chang, L., Ernst, T., Frazier, J., Kaufmann, W. E., Keating, B., Kenet, T., Kennedy, D., Mostofsky, S., Murray, S. S., Sowell, E. R., ... Gruen, J. R. (2016). Dyslexia and language impairment associated genetic markers influence cortical thickness and white matter in typically developing children. *Brain Imaging and Behavior*, 10, 272-282. <https://doi.org/10.1007/s11682-015-9392-6>
- Fargier, R., Ménorte, M., Boulenger, V., Nazir, T. A. et Paulignan, Y. (2012a). Grasp It Loudly! Supporting Actions with Semantically Congruent Spoken Action Words. *PloS one*, 7(1), e30663. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0030663>
- Fargier, R., Paulignan, Y., Boulenger, V., Monaghan, P., Reboul, A. et Nazir, T. A. (2012b). Learning to associate novel words with motor actions: Language-induced motor activity following short training. *Cortex*, 48(7), 888-899. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2011.07.003>

- Fargier, R., Ploux, S., Cheylus, A., Reboul, A., Paulignan, Y. et Nazir, T. A. (2014). Differentiating semantic categories during the acquisition of novel words: Correspondence analysis applied to event-related potentials. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 26(11), 2552-2563. https://doi.org/10.1162/jocn_a_00669
- Fazekas, P. et Nanay, B. (2017). Pre-Cueing Effects: Attention or Mental Imagery? *Frontiers in Psychology*, 8. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpsyg.2017.00222>
- Fisher, A. J., Medaglia, J. D. et Jeronimus, B. F. (2018). Lack of group-to-individual generalizability is a threat to human subjects research. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 115(27), E6106-E6115. <https://doi.org/10.1073/pnas.1711978115>
- Flapper, B. C. T. et Schoemaker, M. M. (2013). Developmental Coordination Disorder in children with specific language impairment: Co-morbidity and impact on quality of life. *Research in Developmental Disabilities*, 34(2), 756-763. <https://doi.org/10.1016/j.ridd.2012.10.014>
- Fodor, J. A. et Fodor, J. A. (1987). *Psychosemantics: The problem of meaning in the philosophy of mind* (vol. 2). MIT press.
- Forssberg, H., Eliasson, a C., Kinoshita, H., Johansson, R. S. et Westling, G. (1991). Development of human precision grip. I: Basic coordination of force. *Experimental brain research*, 85(2), 451-457. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/1893993>

- Frak, V., Labrecque, D. et Cohen, H. (2021). Action verbs drive motor activity in adolescents but not in children. *Brain and Cognition*, 148(December), 105673. <https://doi.org/10.1016/j.bandc.2020.105673>
- Frak, V., Nazir, T., Goyette, M., Cohen, H. et Jeannerod, M. (2010). Grip force is part of the semantic representation of manual action verbs. *PloS one*, 5(3), e9728. <https://doi.org/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. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/15866191>
- Gentilucci, M., Benuzzi, F., Bertolani, L., Daprati, E. et Gangitano, M. (2000). Language and motor control. *Experimental Brain Research*, 133(4), 468-490. <https://doi.org/10.1007/s002210000431>
- Gentilucci, M., Campione, G. C., Dalla Volta, R. et Bernardis, P. (2009). The observation of manual grasp actions affects the control of speech: A combined behavioral and Transcranial Magnetic Stimulation study. *Neuropsychologia*, 47(14), 3190-3202. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2009.07.020>
- Gérard, C.-Loïc. (1991). *L'enfant dysphasique*. Éditions universitaires.
- Gérard, C.-Loïc. (1993). *L'enfant dysphasique : évaluation et rééducation* (2e éd.). De Boeck-Université.
- Geschwind, N. (1965). Disconnexion syndromes in animal and man. *Brain*, 88, 585-644.

- Ghio, M., Locatelli, M., Tettamanti, A., Perani, D., Gatti, R. et Tettamanti, M. (2018). Neuropsychologia Cognitive training with action-related verbs induces neural plasticity in the action representation system as assessed by gray matter brain morphometry. *Neuropsychologia*, 114(October 2017), 186-194. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2018.04.036>
- Glenberg, a M. (1997). What memory is for. *The Behavioral and brain sciences*, 20(1), 1-19; discussion 19-55.
- Glenberg, A. M. et Kaschak, M. P. (2002). Grounding language in action. *Psychonomic Bulletin & Review*, 9(3), 558-565. <https://doi.org/10.3758/BF03196313>
- Greeno, J. G. (1994). Gibson's affordances. *Psychological Review*, 101(2), 336-342. <https://doi.org/10.1037/0033-295X.101.2.336>
- Grèzes, J., Armony, J. L., Rowe, J. et Passingham, R. E. (2003). Activations related to "mirror" and "canonical" neurones in the human brain: an fMRI study. *NeuroImage*, 18(4), 928-937. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S1053-8119\(03\)00042-9](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S1053-8119(03)00042-9)
- Guiraud, H., Bedoin, N., Krifi-Papoz, S., Herbillon, V., Caillot-Bascoul, A., Gonzalez-Monge, S. et Boulenger, V. (2018). Don't speak too fast! Processing of fast rate speech in children with specific language impairment. *PLoS ONE*, 13(1), 1-23. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0191808>
- Harnad, S. (1990). The symbol grounding problem. *Physica D: Nonlinear Phenomena*, 42(1), 335-346. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0167-2789\(90\)90087-6](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0167-2789(90)90087-6)

- Hauk, O. (2016). Only time will tell – why temporal information is essential for our neuroscientific understanding of semantics. *Psychonomic Bulletin and Review*, 23(4), 1072-1079. <https://doi.org/10.3758/s13423-015-0873-9>
- Hauk, O., Johnsrude, I. et Pulvermüller, F. (2004). Somatotopic representation of action words in human motor and premotor cortex. *Neuron*, 41(2), 301-7. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/14741110>
- Hauk, O., Shtyrov, Y. et Pulvermüller, F. (2008). The time course of action and action-word comprehension in the human brain as revealed by neurophysiology. *Journal of Physiology*, 102(1), 50-58. <https://doi.org/10.1016/j.jphysparis.2008.03.013>
- Hauk, O. et Tschentscher, N. (2013). The Body of Evidence: What Can Neuroscience Tell Us about Embodied Semantics? *Frontiers in psychology*, 4, 50. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2013.00050>
- Hebb, D. O. (1949). Organization of behavior. new york: Wiley. *J. Clin. Psychol*, 6(3), 307-335.
- Hertrich, I., Dietrich, S. et Ackermann, H. (2016). The role of the supplementary motor area for speech and language processing. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, 68, 602-610. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2016.06.030>
- Hommel, B., Müsseler, J., Aschersleben, G. et Prinz, W. (2001). The Theory of Event Coding (TEC): a framework for perception and action planning. *The Behavioral and brain sciences*, 24(5), 849-937.

- Hommet, C., Billard, C., de Toffol, B. et Autret, A. (2003). Latéralisation fonctionnelle cérébrale chez l'enfant: théories du développement et implication dans les pathologies du développement. *Revue neurologie*, 159(11), 997-1007.
- Iverson, J. M. et Goldin-Meadow, S. (1998). Why people gesture when they speak. *Nature*, 396, 228-228.
- James, K. H. et Maouene, J. (2009). Auditory verb perception recruits motor systems in the developing brain: An fMRI investigation. *Developmental Science*, 12(6).
<https://doi.org/10.1111/j.1467-7687.2009.00919.x>
- Janosky, J. E. (2005). Use of the single subject design for practice based primary care research. *Postgraduate Medical Journal*, 81(959), 549.
<https://doi.org/10.1136/pgmj.2004.031005>
- Jeannerod, M. (1994). The representing brain: Neural correlates of motor intention and imagery. *Behavioral and Brain Sciences*, 17(2), 187-245.
<https://doi.org/10.1017/S0140525X00034026>
- Jeannerod, M. et Frak, V. (1999). Mental imaging of motor activity in humans. *Current opinion in neurobiology*, 9(6), 735-9.
- Juárez, F. P., Labrecque, D. et Frak, V. (2019). Assessing language-induced motor activity through Event Related Potentials and the Grip Force Sensor , an exploratory study. *Brain and cognition*, 135(September 2018), 103572.
<https://doi.org/10.1016/j.bandc.2019.05.010>
- Kallionpää, R. E., Pesonen, H., Scheinin, A., Sandman, N., Laitio, R., Scheinin, H., Revonsuo, A. et Valli, K. (2019). Single-subject analysis of N400 event-related

potential component with five different methods. *International Journal of Psychophysiology*, 144, 14-24. <https://doi.org/10.1016/j.ijpsycho.2019.06.012>

Kambanaros, M. (2013). Does verb type affect action naming in specific language impairment (SLI)? Evidence from instrumentality and name relation. *Journal of Neurolinguistics*, 26(1), 160-177. <https://doi.org/10.1016/j.jneuroling.2012.07.003>

Kellenbach, M. L., Wijers, A. A., Hovius, M., Mulder, J. et Mulder, G. (2002). Neural Differentiation of Lexico-Syntactic Categories or Semantic Features? Event-Related Potential Evidence for Both. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 14(4), 561-577. <https://doi.org/10.1162/08989290260045819>

Kintsch, W. (1988). The role of knowledge in discourse comprehension: A construction-integration model. *Psychological Review*, 95(2), 163-182. <https://doi.org/10.1037/0033-295X.95.2.163>

Krishnan, S. et Watkins, K. E. (2019). A challenge for the procedural deficit hypothesis: How should we measure sequential learning in childhood? *Developmental science*, 22(4), e12815. <https://doi.org/10.1111/desc.12815>

Krishnan, S., Watkins, K. E. et Bishop, D. V. M. (2016). *Neurobiological Basis of Language Learning Difficulties*, (September), 701-714. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2016.06.012>

Kuperman, V., Stadthagen-Gonzalez, H. et Brysbaert, M. (2012). Age-of-acquisition ratings for 30,000 English words. *Behavior Research Methods*, 44(4), 978-990. <https://doi.org/10.3758/s13428-012-0210-4>

- Labrecque, D. (2016). *Étude de la latéralisation de l'activité motrice induite par le langage chez l'être humain entre 5 et 18 ans* [Université du Québec À Montréal]. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.14769.79201>
- Labrecque, D., Descheneaux, R. L., Ariza Gomes de Castros, A. et Frak, V. (2016). Portable Device Validation to Study the Relation between Motor Activity and Language: Verify the Embodiment Theory through Grip Force Modulation. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, 5(12), 5-10. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.17577/IJERTV5IS120003>
- Lechevalier, B. et Habas, C. (2021). Procedural memory and declarative memory. *Bulletin de l'Academie Nationale de Medecine*, 205(2), 149-153. <https://doi.org/10.1016/j.banm.2020.12.011>
- Liégeois, F., Mayes, A. et Morgan, A. (2014). Neural Correlates of Developmental Speech and Language Disorders: Evidence from Neuroimaging. *Current developmental disorders reports*, 1(3), 215-227. <https://doi.org/10.1007/s40474-014-0019-1>
- Liepmann, H. (1905). Die linke Hemisphäre und das Handeln. *Munchener Medizinische Wochenschrift*, 49, 2322-2326. <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-0000149481&partnerID=40&md5=bf3470e49db719e595b1c4da26867c86>
- Mahon, B. Z. et Hickok, G. (2016). Arguments about the nature of concepts: Symbols, embodiment, and beyond. *Psychonomic Bulletin & Review*, 23(4), 941-958. <https://doi.org/https://doi.org/10.3758/s13423-016-1045-2>

- Marangolo, P., Bonifazi, S., Tomaiuolo, F., Craighero, L., Coccia, M., Altoè, G., Provinciali, L. et Cantagallo, A. (2010). Improving language without words: First evidence from aphasia. *Neuropsychologia*, 48(13), 3824-3833. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2010.09.025>
- Mayes, A. K., Reilly, S. et Morgan, A. T. (2015). Neural correlates of childhood language disorder: A systematic review. *Developmental Medicine and Child Neurology*, 57(8), 706-717. <https://doi.org/10.1111/dmcn.12714>
- Mazoyer, B., Zago, L., Jobard, G., Crivello, F., Joliot, M., Perchey, G., Mellet, E., Petit, L. et Tzourio-Mazoyer, N. (2014). Gaussian mixture modeling of hemispheric lateralization for language in a large sample of healthy individuals balanced for handedness. *PLoS ONE*, 9(6), 9-14. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0101165>
- Mcneish, D. M. et Stapleton, L. M. (2016). The Effect of Small Sample Size on Two-Level Model Estimates: A Review and Illustration. *Source: Educational Psychology Review*, 28(2), 295-314. <https://doi.org/10.1007/s>
- Mestres-Missé, A., Rodriguez-Fornells, A. et Münte, T. F. (2009). Neural differences in the mapping of verb and noun concepts onto novel words. *NeuroImage*. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2009.10.018>
- Meteyard, L., Rodriguez, S., Bahrami, B. et Vigliocco, G. (2012). Coming of age : A review of embodiment and the neuroscience of semantics. *CORTEX*, 48(7), 788-804. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2010.11.002>
- Michel, G. F., Babik, I., Nelson, E. L., Campbell, J. M. et Marcinowski, E. C. (2013). How the development of handedness could contribute to the development of

language. *Developmental Psychobiology*, 55(6), 608-620.
<https://doi.org/10.1002/dev.21121>

Miklashevsky, A., Lindemann, O. et Fischer, M. H. (2021). The Force of Numbers: Investigating Manual Signatures of Embodied Number Processing. *Frontiers in Human Neuroscience*, 14(January 2021).
<https://doi.org/10.3389/fnhum.2020.590508>

Mollo, G., Pulvermüller, F. et Hauk, O. (2016). Movement priming of EEG / MEG brain responses for action- words characterizes the link between language and action. *Cortex*, 74, 262-276. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2015.10.021>

Naito, E., Morita, T. et Amemiya, K. (2016). Body representations in the human brain revealed by kinesthetic illusions and their essential contributions to motor control and corporeal awareness. *Neuroscience Research*, 104(2016), 16-30.
<https://doi.org/10.1016/j.neures.2015.10.013>

Nazir, T. A., Hrycyk, L., Moreau, Q., Frak, V., Cheylus, A., Ott, L., Lindemann, O., Fischer, M. H., Paulignan, Y. et Delevoye-Turrell, Y. (2017). A simple technique to study embodied language processes: the grip force sensor. *Behavior Research Methods*. <https://doi.org/10.3758/s13428-015-0696-7>

New, B., Pallier, C., Ferrand, L. et Matos, R. (2001). Une base de données lexicales du français contemporain sur internet: LEXIQUE. *L'année psychologique*, 101, 447-462. <https://doi.org/10.3406/psy.2001.1341>

Newell, A. (1980). Physical symbol systems. *Cognitive Science*, 4(2), 135-183.
[https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0364-0213\(80\)80015-2](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0364-0213(80)80015-2)

- Oldfield, R. C. (1971). The assessment and analysis of handedness: the Edinburgh inventory. *Neuropsychologia*, 9, 97-113. [https://doi.org/10.1016/0028-3932\(71\)90067-4](https://doi.org/10.1016/0028-3932(71)90067-4)
- Pexman, P. M., Hargreaves, I. S., Siakaluk, P. D., Bodner, G. E. et Pope, J. (2008). There are many ways to be rich: Effects of three measures of semantic richness on visual word recognition. *Psychonomic Bulletin and Review*, 15(1), 161-167. <https://doi.org/10.3758/PBR.15.1.161>
- Phylyshyn, Z. W. (1984). *Computation and cognition. Toward a foundation for cognitive science*. The MIT Press. Cambridge, MA.
- Polich, J. (2007). Updating P300: An integrative theory of P3a and P3b. *Clinical Neurophysiology*, 118(10), 2128-2148. <https://doi.org/10.1016/j.clinph.2007.04.019>
- Preissl, H., Pulvermüller, F., Lutzenberger, W. et Birbaumer, N. (1995). Evoked potentials distinguish between nouns and verbs. *Neuroscience Letters*, 197(1), 81-83. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0304-3940\(95\)11892-Z](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0304-3940(95)11892-Z)
- Price, P. C., Jhangiani, R. et Chiang, I.-C. A. (2015). *Research Methods in Psychology* (2nd Canadian Edition). BCcampus. <https://opentextbc.ca/researchmethods/>.
- Pulvermüller, F. (2018). Neural reuse of action perception circuits for language, concepts and communication. *Progress in Neurobiology*, 160(2018), 1-44. <https://doi.org/10.1016/j.pneurobio.2017.07.001>
- Pulvermüller, F., Lutzenberger, W. et Preissl, H. (1999). Nouns and Verbs in the Intact Brain: Evidence from Event-related Potentials and High-frequency Cortical

- Responses. *Cerebral Cortex*, 9(5), 497-506.
<https://doi.org/10.1093/cercor/9.5.497>
- Ramayya, A. G., Glasser, M. F. et Rilling, J. K. (2010). A DTI investigation of neural substrates supporting tool use. *Cerebral Cortex*, 20(3), 507-16.
<https://doi.org/10.1093/cercor/bhp141>
- Rapin, I. et Allen, D. A. (1983). Developmental Language Disorders: Nosologic Considerations. Dans U. Kirk (dir.), *Neuropsychology of Language, Reading, and Spelling* (United Kin, chap. 8, p. 283). Academic Press.
- Reilly, S., Tomblin, B., Law, J., Mckean, C., Mensah, F. K., Morgan, A., Goldfeld, S., Nicholson, J. M. et Wake, M. (2014). *Specific language impairment : a convenient label for whom ?*, 416-451. <https://doi.org/10.1111/1460-6984.12102>
- Rizzolatti, G. et Craighero, L. (2004). The mirror-neuron system. *Annual Review of Neuroscience*, 27, 169-192.
<https://doi.org/10.1146/annurev.neuro.27.070203.144230>
- Rossi, S., Pasqualetti, P., Tecchio, F., Pauri, F. et Rossini, P. M. (1998). Corticospinal excitability modulation during mental simulation of wrist movements in human subjects. *Neuroscience Letters*, 243(1), 147-151.
[https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0304-3940\(98\)00088-3](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0304-3940(98)00088-3)
- Sahin, N. T., Steven, P., Cash, S., Donald, S. et Eric, H. (2009). Sequential Processing of Lexical, Grammatical, and Phonological Information Within Broca's Area. *Science*, 326(5951), 445-449. <https://doi.org/10.1126/science.1174481>

- Sakata, H. et Taira, M. (1994). Parietal control of hand action. *Current Opinion in Neurobiology*, 4, 847-856.
- Siakaluk, P. D., Pexman, P. M., Aguilera, L., Owen, W. J. et Sears, C. R. (2008). Evidence for the activation of sensorimotor information during visual word recognition: The body-object interaction effect. *Cognition*, 106(1), 433-443. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2006.12.011>
- Sidhu, D. M., Heard, A. et Pexman, P. M. (2016). Is more always better for verbs? Semantic richness effects and verb meaning. *Frontiers in Psychology*, 7(MAY), 1-14. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2016.00798>
- Sidhu, D. M., Kwan, R., Pexman, P. M. et Siakaluk, P. D. (2014). Effects of relative embodiment in lexical and semantic processing of verbs. *Acta Psychologica*, 149, 32-39.
- Stout, D. et Chaminade, T. (2012). Stone tools, language and the brain in human evolution. *Philosophical transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological sciences*, 367, 75-87. <https://doi.org/10.1098/rstb.2011.0099>
- Toga, A. W., Thompson, P. M. et Sowell, E. R. (2006). Mapping brain maturation. *Trends in neurosciences*, 29(3), 148-59. <https://doi.org/10.1016/j.tins.2006.01.007>
- Tomasino, B. et Gremese, M. (2016). Effects of stimulus type and strategy on mental rotation network: An activation likelihood estimation meta-analysis. *Frontiers in human neuroscience*, 9, 693. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2015.00693>

- Tunik, E., Rice, N., Hamilton, A. et Grafton, S. (2007). Beyond grasping: representation of action in human anterior intraparietal sulcus. *NeuroImage*, 36, 77-86. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2007.03.026>
- Tzourio-Mazoyer, N., Zago, L., Cochet, H. et Crivello, F. (2020). Development of handedness, anatomical and functional brain lateralization. Dans *Handbook of Clinical Neurology* (vol. 173, p. 99-105). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-64150-2.00011-3>
- Ullman, M. T., Earle, F. S., Walenski, M. et Janacek, K. (2020). The neurocognition of developmental disorders of language. *Annual Review of Psychology*, 71, 389-417. <https://doi.org/10.1146/annurev-psych-122216-011555>
- Ullman, M. T. et Pierpont, E. I. (2005). Specific language impairment is not specific to language: the procedural deficit hypothesis. *Cortex*, 41, 399-433. [https://doi.org/10.1016/S0010-9452\(08\)70276-4](https://doi.org/10.1016/S0010-9452(08)70276-4)
- Vernes, S. C., Newbury, D. F., Abrahams, B. S., Winchester, L., Nicod, J., Groszer, M., Alarcón, M., Oliver, P. L., Davies, K. E., Geschwind, D. H., Monaco, A. P. et Fisher, S. E. (2008). A Functional Genetic Link between Distinct Developmental Language Disorders. *New England Journal of Medicine*, 359(22), 2337-2345. <https://doi.org/10.1056/nejmoa0802828>
- Vezina, M., Samson-Morasse, C., Gauthier-Desgagne, J., Fossard, M. et Sylvestre, A. (2011). Development of the French Quebec version of the Children's Communication Checklist-2 (CCC-2). Translation, adaptation, and conceptual equivalence. *Canadian Journal of Speech-Language Pathology and Audiology/Revue canadienne d'orthophonie et d'audiologie*, 35(3), 244-253. <http://search.proquest.com/docview/908018200?accountid=13828%5Cnhttp://fin>

d.shef.ac.uk/openurl/44SFD/44SFD_services_page?url_ver=Z39.88-2004&rft_val_fmt=info:ofi/fmt:kev:mtx:journal&genre=article&sid=ProQ:ProQ:llbashell&atitle=Development+of+the+French+Qu

Vézina, M., Sylvestre, A. et Fossard, M. (2013). Développement de la Version Québécoise Francophone du Children's Communication Checklist-2 (CCC-2): Normalisation et Équivalence Métrique = Development of a Quebec French version of the Children's Communication Checklist-2 (CCC-2): Normalisation and metr. *Canadian Journal of Speech-Language Pathology and Audiology*, 37(2), 156-168.

<http://proxy.libraries.smu.edu/login?url=http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=psych&AN=2014-05770-002&site=ehost-live&scope=site%0Ahttp://audette.sylvestre@rea.ulaval.ca>

West, G., Vadillo, M. A., Shanks, D. R. et Hulme, C. (2018). The procedural learning deficit hypothesis of language learning disorders: we see some problems. *Developmental Science*, 21(2), 1-13. <https://doi.org/10.1111/desc.12552>

West, G., Vadillo, M. A., Shanks, D. R. et Hulme, C. (2019). The procedural deficit hypothesis of language learning disorders: We still see some serious problems. *Developmental Science*, 22(4), 1-2. <https://doi.org/10.1111/desc.12813>

Wheaton, K. J., Thompson, J. C., Syngieniotis, A., Abbott, D. F. et Puce, A. (2004). Viewing the motion of human body parts activates different regions of premotor, temporal, and parietal cortex. *NeuroImage*, 22(1), 277-288. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2003.12.043>

World Health Organization. (2022). *International Classification of Diseases Eleventh Revision (ICD-11)*.

- Xia, Q., Wang, L. et Peng, G. (2016). Nouns and verbs in Chinese are processed differently: Evidence from an ERP study on monosyllabic and disyllabic word processing. *Journal of Neurolinguistics*, 40, 66-78.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jneuroling.2016.06.002>
- Zhang, Q., Ding, J., Guo, C. et Wang, Z. (2003). ERP difference between processing of nouns and verbs. *Acta Psychologica Sinica*, 35(6), 753-760.
<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-42349087776&partnerID=40&md5=1c6b89c23b8ab7b461cadbf83e86df7e>
- Zwaan, R. A. et Madden, C. J. (2005). *Embodied sentence comprehension. Grounding Cognition: The Role of Perception and Action in Memory, Language, and Thinking*. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511499968.010>

