

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL

EFFETS DE DEUX INTERVENTIONS SUR LE FONCTIONNEMENT
CÉRÉBRAL DANS LE CONTEXTE D'UN APPRENTISSAGE NÉCESSITANT
DU RECYCLAGE NEURONAL

THÈSE
PRÉSENTÉE
COMME EXIGENCE PARTIELLE
DU DOCTORAT EN ÉDUCATION

PAR
LORIE-MARLÈNE BRAULT FOISY

NOVEMBRE 2020

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.10-2015). 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.»

*À tou(te)s ces enseignant(e)s inspirant(e)s qui
encouragent leurs élèves à changer le monde*

REMERCIEMENTS

Cette thèse doctorale est le résultat d'un travail auquel plusieurs personnes ont contribué. Je tiens donc à remercier ici les personnes qui ont rendu ce projet possible et qui, en plus, en ont fait un défi agréable à réaliser. J'ai eu le privilège de commencer à côtoyer plusieurs de ces personnes dès la fin de mon baccalauréat et l'affection que j'ai pour elles relève maintenant davantage de l'amitié que de la simple relation de travail.

Je souhaite d'abord remercier chaleureusement mon directeur de recherche, Steve Masson, qui, après avoir dirigé ma maîtrise, a accepté de renouveler l'expérience en encadrant cette thèse. Steve, en commençant ce projet, nous avions bien conscience de son ampleur et du défi qui nous attendait, mais nous avons quand même choisi de nous lancer dans l'aventure avec confiance. Sache que sans toi je n'aurais pas eu le courage de l'entreprendre. Merci pour ton support inconditionnel à travers ce long processus, pour tes rétroactions toujours rapides et éclairantes, pour ton intelligence stimulante et pour ta détermination à développer sans relâche le champ de recherche de la neuroéducation.

Je tiens aussi à adresser mes remerciements les plus sincères à mon codirecteur de recherche, Martin Riopel. Martin, ta sagesse m'inspire continuellement à vouloir bien faire les choses, de façon droite, rigoureuse et nuancée. Merci pour les nombreuses discussions que nous avons eues ensemble sur mon projet, et aussi sur le monde de la recherche en général. Sache que par ton support tranquille, tu as su m'apprendre à me faire davantage confiance en tant que chercheure.

Aux deux collaborateurs de ce projet, les professeurs Stanislas Dehaene et Julie-Myre Bisailon, je vous remercie de m'avoir apporté votre généreux soutien à différentes étapes de cette thèse. Vos expertises respectives ont facilité significativement la réalisation de ce projet de recherche. Je tiens aussi à souligner la contribution importante d'Antonio Moreno qui a bravement combattu à mes côtés les codes d'erreur de Matlab avec patience et dévouement.

Je souhaite également offrir un merci particulier à Jérémie Blanchette Sarrasin, celle sur qui je peux toujours compter pour tout, sans exception, qui s'est montrée indispensable à la réalisation de cette thèse. Merci de t'être investie dans ce projet comme si c'était le tien. Tu as joué un rôle central dans sa réussite et je t'en suis vraiment reconnaissante.

Ce projet n'aurait bien entendu jamais pu voir le jour sans la participation de plus de 40 élèves du préscolaire qui ont fait preuve d'une implication des plus admirables. Un immense merci à eux tous d'avoir accepté de « partir en mission dans l'espace ». Je remercie également tous les enseignant(e)s motivé(e)s qui se sont montré(e)s intéressé(e)s par le projet et qui nous ont généreusement accueillis dans leur classe.

À Patrice Potvin, celui qui a codirigé ma maîtrise et qui a été un point d'ancrage important dans mon parcours aux études supérieures : merci de m'avoir toujours ouvert la porte de ton bureau (même lorsqu'elle était fermée), merci d'avoir été un modèle inspirant de chercheur fougueux et déterminé qui croit en ses étudiants, et merci d'avoir représenté pour moi ce repère sécurisant à travers les années.

Special thanks to Reuven Babai with whom I had the chance to discuss not only research but also life on many occasions, all the while eating grapes and playing Shesh Besh. You have been a significant person in my journey!

Plusieurs personnes ont été présentes dans ma vie sur ce chemin doctoral et je tiens ici à les interpeller et les remercier pour différentes raisons qu'elles comprendront : Yannick Skelling-Desmeules (partenaire officiel de brunch), Amine Mahou (« Tech Guy » et compagnon de collation), Frédéric Fournier (équipe B20!), Emmanuel Ahr (mon personnage de manga préféré) et Caroline Duplantis (celle qui rend tout beau). Mon parcours n'aurait pas été le même sans vous à mes côtés! Je remercie également Steeve Esculier qui m'a offert son soutien à plusieurs égards depuis la maîtrise.

Je dédie une pensée et un merci particulier à mes trois « partners » et amis du G-squad avec qui tout a commencé : Geneviève Allaire-Duquette, Olivier Arvisais et Jean-Philippe Ayotte-Beaudet. Geneviève (alias *melon*), ancienne coloc de bureau devenue amie : merci de m'avoir stimulée et mise au défi, de m'avoir donné le goût de me dépasser chaque jour au bureau et d'avoir toléré mon immense bol de salade que tu détestais. Olivier, « p'tit nouveau du 3^e étage » à l'époque : merci de me faire découvrir continuellement de nouvelles facettes de la recherche en éducation et merci d'être aujourd'hui ce collègue inspirant. J-P, complice de tant de moments de ma vie, merci merci d'en être un pilier si important.

À mon préféré qui se reconnaîtra, chaque jour je me trouve donc chanceuse de t'avoir!

Mes derniers remerciements sont dirigés avec puissance et amour à mes parents qui ont été pour moi des modèles de persévérance et que j'admire sincèrement et profondément. Merci de m'avoir véritablement tout donné et d'être aussi présents dans ma vie. Je ne pourrai jamais suffisamment vous remercier.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	iii
LISTE DES FIGURES.....	x
LISTE DES TABLEAUX.....	xii
RÉSUMÉ	xiv
ABSTRACT	xvii
INTRODUCTION	1
CHAPITRE I Problématique	4
1.1 Pratiques éducatives appuyées par la recherche.....	4
1.2 Pertinence de mieux comprendre les mécanismes d'apprentissage	10
1.3 Importance de mieux comprendre les contraintes cérébrales associées à l'apprentissage et à l'enseignement	15
1.4 Prise en compte des contraintes cérébrales dans le choix des approches d'enseignement	20
1.5 Question de recherche	24
CHAPITRE II Cadre théorique.....	27
2.1 Rôle du mécanisme de recyclage neuronal dans l'apprentissage.....	27
2.1.1 Concept de plasticité cérébrale	27
2.1.2 Concept de recyclage neuronal	34
2.1.3 Mécanismes cérébraux associés au recyclage neuronal pour différents apprentissage scolaires	42

2.1.3.1 Apprentissage de la lecture.....	42
2.1.3.2 Apprentissage de l'arithmétique	54
2.1.3.3 Autres apprentissages impliquant possiblement du recyclage neuronal	61
2.2 Effets de l'enseignement sur le recyclage neuronal.....	63
2.3 Hypothèse de recherche	73
 CHAPITRE III Méthodologie.....	 76
3.1 Devis général du projet de recherche	76
3.2 Participants.....	78
3.2.1 Caractéristiques des participants.....	78
3.2.2 Modalités de recrutement et échantillonnage	80
3.2.3 Formation des deux groupes expérimentaux	83
3.3 Interventions en lecture	92
3.3.1 Description des interventions.....	92
3.3.2 Choix des mots utilisés dans les interventions.....	98
3.3.3 Mise en place des interventions	98
3.4 Collecte des données	102
3.4.1 Choix de la technique d'imagerie	103
3.4.2 Déroulement temporel des séances d'IRMf.....	105
3.4.3 Tâche cognitive.....	110
3.5 Analyse des données comportementales.....	116
3.6 Analyse des données cérébrales	116
3.6.1 Étapes de prétraitements	117
3.6.1.1 Correction du mouvement	117
3.6.1.2 Normalisation	117
3.6.1.3 Lissage.....	117
3.6.2 Traitement statistique des données	122
3.6.2.1 Tests statistiques utilisés.....	117
3.6.2.2 Seuils de significativité.....	117
3.6.2.3 Analyse par région d'intérêt.....	117
3.7 Considérations éthiques	134
3.7.1 Utilisation de l'IRMf.....	134
3.7.2 Obtention d'un consentement éclairé.....	135
3.7.3 Respect de la confidentialité et de l'anonymat	136

CHAPITRE IV Résultats	137
4.1 Résultats comportementaux	138
4.2 Résultats cérébraux	141
4.2.1 L'effet d'interaction	141
4.2.1.1 L'analyse du volume cérébral entier	117
4.2.1.2 L'analyse par région d'intérêt	117
4.2.2 Le sens de l'effet d'interaction.....	143
4.3 Synthèse des résultats.....	145
CHAPITRE V Discussion.....	147
5.1 Retour sur la question et l'hypothèse de recherche.....	148
5.2 Performance des deux groupes à la tâche de lecture.....	150
5.3 Différences d'activation cérébrale observées.....	152
5.3.1 Différence d'activation observée pour le groupe global.....	141
5.3.2 Sens de la différence entre les groupes	117
5.3.3 Absence de différence pour le groupe phonologique.....	117
5.4 Discussion d'une explication alternative	152
5.5 Considérations éducatives.....	152
5.6 Limites de la présente recherche	152
5.7 Quelques perspectives de recherches futures	152
5.7.1 Propositions pour bonifier le projet de recherche actuel.....	141
5.7.2 Perspectives de recherches complémentaires	117
CONCLUSION.....	185
ANNEXE A Documents utilisés lors du recrutement.....	190
ANNEXE B Représentation de l'attrition expérimentale aux différentes étapes du projet de recherche	190
ANNEXE C Liste des mots enseignés dans le cadre des interventions A et B	194
ANNEXE D Planification temporelle des interventions.....	196

ANNEXE E Paramètres d'acquisition des images fonctionnelles et anatomiques ...	198
ANNEXE F Répartition des mots enseignés et des mots nouveaux dans chacune des séries de la tâche d'appariement	199
ANNEXE G Formulaire de dépistage en IRM	200
ANNEXE H Formulaire de consentement.....	202
ANNEXE I Matrice de design issue de SPM8 représentant l'ANOVA de type <i>flexible factorial</i>	209
BIBLIOGRAPHIE	210

LISTE DES FIGURES

Figure 2.1 Identification de la région occipito-temporale gauche	43
Figure 2.2 Identification des principales régions cérébrales faisant partie du réseau de la lecture	49
Figure 3.1 Devis général du projet de recherche.....	78
Figure 3.2 Exemple du matériel utilisé dans le cadre de l'intervention phonologique	94
Figure 3.3 Exemple du matériel utilisé dans le cadre de l'intervention globale	94
Figure 3.4 Extrait du scénario relatif à l'intervention phonologique pour le mot « papa »	95
Figure 3.5 Extrait du scénario relatif à l'intervention globale pour le mot « papa » ..	96
Figure 3.6 Organisation initiale des cohortes d'élèves pour la mise en place des interventions.....	99
Figure 3.7 Déroulement temporel de la participation au projet pour chacune des cohortes	100
Figure 3.8 Images illustrant différentes étapes et éléments importants du projet.....	110

Figure 3.9 Déroulement temporel de la tâche d'appariement.	113
Figure 3.10 Synthèse des principales étapes du processus d'analyse des données cérébrales	125
Figure 4.1 Représentation de l'effet d'interaction Groupe X Temps sur la performance à la tâche pour les mots nouveaux.....	140
Figure 4.2 Régions cérébrales significativement plus activées par l'interaction du groupe (phono/global) et du temps (prétest/posttest) pour les mots nouveaux.	142
Figure 4.3 Région cérébrale significativement plus activée pour le contraste posttest > prétest lors de la lecture des mots nouveaux pour le groupe global.	145

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 3.1 Synthèse des caractéristiques des deux groupes de participants	87
Tableau 3.2 Comparaison de la performance des groupes de l'échantillon initial pour chacun des tests standardisés	90
Tableau 3.3 Comparaison de la performance des groupes de l'échantillon final pour chacun des tests standardisés	91
Tableau 3.4 Synthèse des critères maintenus constants entre les deux interventions.	97
Tableau 3.5 Plan d'analyse complet de l'ANOVA à 4 cellules (2 X 2 niveaux).....	127
Tableau 4.1 Performance moyenne de chacun des groupes en prétest et en posttest pour les deux types de mots.....	138
Tableau 4.2 Résultats de l'analyse de variance à mesures répétées ayant comme variable dépendante la performance à la tâche pour les mots entraînés	139
Tableau 4.3 Résultats de l'analyse de variance à mesures répétées ayant comme variable dépendante la performance à la tâche pour les mots nouveaux	139

Tableau 4.4 Régions cérébrales significativement associées à l'interaction du groupe (phono/global) et du temps (prétest/posttest) issues de l'analyse du cerveau entier pour les mots nouveaux.....	142
Tableau 4.5 Régions cérébrales significativement associées à l'interaction du groupe (phono/global) et du temps (prétest/posttest) issues de l'analyse ROI pour les mots nouveaux	143
Tableau 4.6 Régions cérébrales significativement plus activées en posttest lors de la lecture des mots nouveaux pour les groupes phonologique et global.....	144

RÉSUMÉ

Pour apprendre à lire, les neurones de la région occipito-temporale gauche du cerveau doivent se « recycler », c'est-à-dire reconfigurer considérablement leurs connexions afin d'accueillir la capacité à reconnaître les mots écrits. Or, peu de recherches se sont penchées sur le rôle de l'enseignement dans la mise en place de ce processus de recyclage neuronal. Cette recherche a pour objectif principal de vérifier si des interventions distinctes visant l'apprentissage de la lecture de mots peuvent avoir un impact différent sur le fonctionnement cérébral et sur la mise en place du recyclage neuronal en s'intéressant plus spécifiquement à la spécialisation fonctionnelle de la région occipito-temporale gauche.

Pour ce faire, deux groupes d'élèves non lecteurs de niveau préscolaire ont chacun pris part à une intervention pédagogique différente. Les interventions visaient toutes deux à apprendre à lire une liste de 20 mots. Elles se différenciaient quant à l'unité d'analyse du mot sur laquelle l'attention était dirigée : l'intervention « phonologique » dirigeait l'attention des élèves vers les correspondances graphèmes-phonèmes et l'intervention « globale » dirigeait leur attention vers la forme entière du mot. Des images de l'activité cérébrale des participants ont été prises en prétest et en posttest à l'aide de l'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle (IRMf) alors qu'ils réalisaient une tâche dans laquelle on leur demandait de lire des mots pour lesquels ils s'étaient entraînés durant l'intervention ainsi que des mots nouveaux (non entraînés). Cela a permis de comparer la performance à la tâche de lecture ainsi que l'activité cérébrale des deux groupes (phonologique et global) durant la lecture des mots, au posttest comparativement au prétest. Notre hypothèse était qu'une intervention pédagogique de nature phonologique aurait pour effet de faciliter davantage la spécialisation de la région occipito-temporale gauche, comparativement à une intervention globale. Dans le cadre d'une tâche cognitive en lecture, une confirmation de cette hypothèse se traduirait opérationnellement par une plus grande activation cérébrale dans l'hémisphère gauche du cerveau, plus précisément dans la région occipito-temporale gauche liée à l'expertise en lecture, chez les participants du groupe phonologique.

Les résultats comportementaux montrent que les deux interventions sont associées à une performance significativement plus élevée au posttest pour les mots entraînés. L'intervention phonologique est également associée à une amélioration

significativement plus importante de la performance en lecture pour les mots nouveaux entre le prétest et le posttest, comparativement à l'intervention globale. Sur le plan cérébral, les résultats indiquent toutefois que ce sont les participants du groupe global qui présentent une activité cérébrale significativement plus importante dans une région de l'hémisphère gauche située à la frontière du cortex occipito-temporal et du cortex extrastryé en posttest, comparativement au prétest, lors de la lecture des mots nouveaux. Aucune différence significative d'activité cérébrale n'est observée pour les mots entraînés, lorsque l'on compare les deux moments de mesure entre les deux groupes.

Nous avançons que la différence d'activité cérébrale observée en faveur du groupe global serait possiblement le reflet d'un début d'apprentissage des correspondances graphèmes-phonèmes que les participants auraient découvert de manière implicite à force d'être exposés de manière répétée aux mots écrits. Dans le contexte de la lecture des mots nouveaux, les participants du groupe global auraient donc possiblement recours à cette stratégie précaire de décodage afin de tenter de lire les mots, ce qui se refléterait par une activation plus grande dans la région du cortex occipito-temporal/extrastryé gauche. Ce début d'apprentissage des correspondances serait donc potentiellement associé à une amorce de recyclage neuronal dans la région d'intérêt. Nous croyons également qu'il est possible que le groupe phonologique ait très fortement automatisé les correspondances graphèmes-phonèmes, de sorte que la reconnaissance des mots dans le cadre de la tâche de lecture se fasse de manière quasi instantanée, sans avoir réellement besoin de continuer à porter une grande attention aux correspondances entre les graphèmes et les phonèmes. Ces pistes d'interprétation demeurent néanmoins fragiles et doivent être envisagées avec prudence compte tenu que les résultats cérébraux ont été observés à un seuil non-corrigé.

Cette recherche représente un pas de plus vers une meilleure compréhension de la relation entre l'enseignement et le fonctionnement cérébral. Sur le plan pédagogique, il semble qu'il soit pertinent de maximiser l'exposition aux mots écrits en début d'apprentissage de la lecture, car le cerveau semble être en mesure, à force de répétition, de détecter certaines régularités et de créer des associations entre les lettres et les sons. Cependant, les résultats comportementaux semblent indiquer que cette exposition ne serait possiblement pas suffisante à elle seule pour que l'enfant parvienne à automatiser les correspondances et à lire de façon autonome des mots qui ne lui auraient pas été enseignés. Un enseignement explicite et systématique de la relation entre les lettres et les sons semble en ce sens permettre d'automatiser davantage les correspondances graphèmes-phonèmes et de lire de manière plus autonome des mots nouveaux. Les résultats de ce projet mènent à envisager des pistes de recherches futures visant à étudier la relation entre l'enseignement et d'autres apprentissages scolaires nécessitant la mise en place du recyclage neuronal, ce qui permettrait ultimement une réflexion pédagogique dont la portée serait plus grande.

Mots-clés : contraintes cérébrales, enseignement, lecture, recyclage neuronal, IRMf, neuroéducation.

ABSTRACT

In order to learn to read, neurons in the left occipito-temporal region of the brain must "recycle" themselves, i.e. significantly reconfigure their connections to accommodate the ability to recognize written words. To date, little research has been done on the role of teaching in this neural recycling process. The main objective of this research is therefore to verify whether distinct interventions aimed at learning to read words can have a different impact on brain function and on the implementation of neuronal recycling, by focusing more specifically on the functional specialization of the left occipito-temporal region.

To do this, two groups of nonreaders preschool children that had been exposed to distinct reading interventions were compared. Both interventions aimed to teach participants to read a list of 20 words. They differed in the unit of analysis to which the participants' attention was drawn to. The "phonological" intervention directed students' attention to graphophonological associations, and the "whole-word" intervention directed their attention to the entire word form. Images of participants' brain activity were taken using functional magnetic resonance imaging (fMRI) as they performed a task in which they were asked to read both words they had been trained to read during the intervention and new (untrained) words. The study design allowed comparison of performance on the reading task and brain activity of the two groups (phonological and whole-word) during word reading at posttest compared to pretest. Our hypothesis was that a phonological educational intervention would have the effect of further facilitating the specialization of the left occipito-temporal region, compared to a global intervention. In the context of a cognitive task in reading, a confirmation of this hypothesis would operationally result in greater brain activation in the left hemisphere of the brain, more specifically in the left occipito-temporal region associated to reading expertise, in participants of the phonological group.

The behavioural results obtained show that both interventions are associated with significantly higher posttest performance for trained words. The phonological intervention is also associated with a significantly greater improvement in reading performance for new words between pretest and posttest, compared to the whole-word intervention. With respect to brain activity, however, the results indicate that participants in the whole-word group showed significantly higher brain activity in a

region of the left hemisphere located at the border of the occipito-temporal cortex and the extrastriate cortex, in posttest compared to pretest when reading new words. No significant difference in brain activity was observed for trained words when comparing pretest and posttest between the two groups.

We suggest that the observed difference in brain activity in favor of the whole-word group may reflect early acquisition of grapheme-phoneme associations that participants may have implicitly discovered through repeated exposure to written words. In the context of reading new words, the participants in the whole-word group would therefore possibly use this emerging decoding strategy in an attempt to read the words, which would be reflected by greater activation in the region of the left occipito-temporal/extrastriate cortex. This early learning of associations would thus be potentially correlated with the first signs of neuronal recycling in the region of interest. We also believe it is possible that the phonological group may have overlearned graphophonological associations, so that word reading in the task is almost effortless, with no real need to continue paying close attention to graphophonological associations. However, these avenues of interpretation remain fragile and must be approached with caution given that the cerebral results were observed at an uncorrected threshold.

This research represents a step towards a better understanding of the relationship between teaching and neuronal recycling. From a pedagogical standpoint, it seems relevant to maximize exposure to written words at the beginning of learning to read, since the brain seems to be able, through repetition, to detect certain regularities and infer graphophonological associations. However, the behavioural results suggest that this exposure alone may not be sufficient for children to be able to automate associations and to read new words autonomously. Explicit and systematic teaching of the relationship between letters and sounds seems in this sense to make it possible to further automate graphophonological associations and to infer new words more autonomously. The results of this project lead us to consider future research avenues aimed at investigating the relationship between teaching and other school learning associated with neuronal recycling, which would ultimately allow for more far-reaching pedagogical reflection.

Keywords: cerebral constraints, teaching, reading acquisition, neuronal recycling, fMRI, neuroeducation.

INTRODUCTION

« The brain is highly structured, but is also extremely flexible. It's not a blank slate, but it isn't written in stone, either. » (Alison Gopnik)

Souvent désignée « décennie du cerveau », la décennie des années 90 a été marquée par l'accroissement des connaissances neuroscientifiques et l'avènement de nouvelles technologies d'imagerie cérébrale. Ces progrès en neurosciences ont progressivement mené la communauté de recherche à se questionner sur les retombées possibles des connaissances neuroscientifiques pour le domaine de l'éducation. Une nouvelle approche de recherche interdisciplinaire a ainsi émergé : la neuroéducation. Cette approche s'intéresse à des problématiques propres au milieu de l'éducation à l'aide d'un niveau d'analyse qui est celui du fonctionnement cérébral. La neuroéducation cherche donc à établir un pont entre le fonctionnement cérébral et les mécanismes liés à l'apprentissage et à l'enseignement. De l'avis de plusieurs chercheurs et organisations internationales, une meilleure compréhension du cerveau pourrait en effet fournir des pistes intéressantes afin de mieux comprendre ce qui caractérise différents apprentissages sur le plan cérébral et, ultimement, guider le choix d'approches pédagogiques mieux adaptées à l'organisation et au fonctionnement du cerveau des élèves.

Bien qu'encore jeune, la neuroéducation apporte déjà plusieurs informations intéressantes au domaine de l'éducation. D'abord, il est possible d'obtenir une compréhension plus fondamentale de différents apprentissages scolaires en observant ce qui les caractérise sur le plan cérébral, c'est-à-dire en identifiant les changements

qui s'opèrent durant l'apprentissage grâce à la plasticité cérébrale. Un deuxième élément permet également de mieux comprendre les retombées éducatives des études s'intéressant au fonctionnement du cerveau. Il renvoie à l'idée, mise en évidence par plusieurs recherches, que la plasticité cérébrale ne serait pas infinie et présenterait certaines limites. Cette plasticité serait en effet influencée par différentes contraintes, en particulier par la structure et l'organisation initiale du cerveau, c'est-à-dire l'architecture cérébrale préalable à l'apprentissage. La relation entre le cerveau et l'apprentissage est donc bidirectionnelle : l'apprentissage modifie le fonctionnement du cerveau en raison de sa plasticité, mais, réciproquement, le cerveau impose des contraintes à la façon dont certains apprentissages peuvent se réaliser. Ces contraintes peuvent ainsi rendre certains apprentissages plus difficiles à réaliser et, ultimement, faire obstacle à la réussite scolaire. Cela mène donc à penser qu'il devient important de réfléchir l'enseignement de façon à ce qu'il prenne aussi en considération le fonctionnement et l'organisation du cerveau des élèves.

S'inscrivant dans le domaine de la neuroéducation, la présente recherche a pour objectif de vérifier si la prise en compte des contraintes cérébrales dans le choix des approches d'enseignement qui sont mises en place peut avoir une incidence sur l'apprentissage et sur les modifications cérébrales qui découlent de cet apprentissage. Ce projet s'intéresse plus précisément aux effets respectifs, sur le plan cérébral, de deux approches d'enseignement distinctes, dans le contexte d'un apprentissage scolaire nécessitant de mettre en place des mécanismes de recyclage neuronal : celui de la lecture de mots.

Le premier chapitre de cette thèse pose la problématique éducative de la recherche en présentant un portrait de la situation à l'étude. Ce chapitre expose donc le problème de recherche et en justifie la pertinence sur les plans scientifique et social. Il se termine par l'énoncé de la question de recherche. Le deuxième chapitre, le cadre théorique,

présente les bases théoriques de la recherche en définissant d'abord les deux principaux concepts : la plasticité cérébrale et le recyclage neuronal. Puis, ce chapitre présente un état des connaissances sur les mécanismes cérébraux associés au recyclage neuronal pour différents apprentissages scolaires. Il se termine par l'énoncé de l'hypothèse de recherche. Le troisième chapitre décrit le cadre méthodologique en précisant le devis général du projet de recherche, les caractéristiques des participants et la composition des groupes expérimentaux, la nature des interventions mises en place, le type d'appareil d'imagerie cérébrale choisi, les modalités de réalisation de la collecte et de l'analyse des données ainsi que les considérations éthiques d'usage. Le quatrième chapitre fait état des résultats comportementaux et cérébraux obtenus à la suite de l'analyse des données. Finalement, le cinquième et dernier chapitre discute de l'interprétation de ces résultats de façon à répondre à la question de recherche et à faire un retour sur l'hypothèse qui avait été avancée. Il aborde également les retombées pédagogiques possibles de cette recherche au niveau de l'apprentissage et de l'enseignement et discute des limites du projet ainsi que des perspectives de recherches futures.

CHAPITRE I

PROBLÉMATIQUE

Dans ce premier chapitre, la problématique éducative à l'origine de ce projet de recherche est présentée. Les sections qui suivent permettent d'aborder les éléments clés de cette problématique. Il est d'abord question de l'idée d'appuyer les pratiques éducatives sur la recherche en vue de favoriser la réussite scolaire des élèves. Puis, dans cette optique, la pertinence de mieux comprendre les processus cognitifs et cérébraux qui sont impliqués dans l'acte d'apprendre est abordée comme moyen pour favoriser l'adoption de pratiques éducatives efficaces. Finalement, l'intérêt d'identifier et de comprendre les contraintes cérébrales ainsi que leur incidence sur l'apprentissage et sur le choix des approches d'enseignement à privilégier sont discutés. La réflexion par rapport à ces différents éléments mène à la formulation de la question de recherche sous-tendant ce projet. Finalement, les incidences possibles de la présente recherche sont discutées au regard des aspects scientifique et social.

1.1 Pratiques éducatives appuyées par la recherche

Depuis déjà plusieurs années, la réussite scolaire occupe une place centrale dans les discours et les actions éducatives gouvernementales. Un mouvement ayant comme objectif la réussite des élèves s'est graduellement développé, tant au niveau international que national. Cette préoccupation pour la réussite scolaire s'exprime de

différentes façons : évaluations standardisées et répétées des acquis scolaires, modifications aux programmes de formation, élaboration de plans d'action, etc. (Marquis, 2016). À l'échelle internationale, plusieurs programmes d'évaluation standardisés (p. ex., TIMSS, PIRLS, PISA) ont été mis en place afin de poser un diagnostic sur la performance et la réussite des élèves et d'évaluer les facteurs pouvant influencer cette réussite.

L'un des moyens mis de l'avant dans les dernières années par la communauté scientifique (Stephenson, 2009; Pasquinelli, 2015; Slavin, 2002; Masson, 2015; Newton, 2015; Hattie, 2013, 2015), mais également par les décideurs politiques (Conseil supérieur de l'éducation, 2006; National Research Council, 2002) consiste à favoriser l'adoption de pratiques éducatives efficaces prenant appui sur des résultats de recherche probants en éducation. Le principe d'une éducation fondée sur la recherche scientifique consiste à identifier les pratiques éducatives pour lesquelles des résultats de recherches empiriques démontrent qu'elles sont susceptibles de produire des résultats positifs en termes d'apprentissage (en anglais, on les désigne souvent par le terme *evidence-based practices*, EBPs, Forman, 2015; Reddy, Forman, Stoiber et Gonzalez, 2017; Slavin, 2002). Il peut s'agir de stratégies pédagogiques, d'interventions éducatives ou de programmes d'enseignement qui produisent des résultats positifs lorsqu'évalués par le biais d'un protocole expérimental (Mesibov et Shea, 2011; Simpson, 2005). À titre d'exemples, les domaines de la médecine, de la psychologie, de l'ingénierie et de l'agriculture ont d'ailleurs emprunté cette voie afin d'établir des ponts entre la recherche et les milieux de la pratique (Pasquinelli, 2015; Slavin, 2002; Masson, 2015). Slavin (2008) défend ainsi cette idée d'une éducation fondée sur les preuves scientifiques en mettant de l'avant les retombées et avantages que cette approche a eu pour d'autres domaines (p. 5, traduction libre) :

Tout au long de l'histoire de l'éducation, l'adoption des programmes et des pratiques pédagogiques a été guidée plus par l'idéologie, les modes, la politique, et la commercialisation que par l'existence de preuves. [...] Cette situation contraste avec celle de domaines tels que la médecine et l'agriculture, dans lesquels l'utilisation d'évidences comme base pour la pratique a conduit à des progrès spectaculaires, au gré de nouvelles pratiques se démontrant plus efficaces et supplantant progressivement les moins efficaces.

Bien entendu, ces domaines présentent des différences évidentes avec celui de l'éducation. Cependant, ils partagent également des similitudes, notamment leur objectif de vouloir « améliorer à long terme le bien-être des êtres humains » (Fischer Goswami et Geake, 2010, traduction libre). La médecine et l'éducation ont en ce sens toutes deux la volonté de « dépasser des limites, d'augmenter des capacités et d'améliorer des conditions imposées par la nature » (Pasquinelli, 2015). En médecine, il peut s'agir de conditions physiques particulières qui doivent être améliorées ou traitées. En éducation, un parallèle peut être établi puisqu'on constate que les êtres humains naissent avec des aptitudes et des prédispositions à apprendre des contenus d'une certaine manière et que l'introduction d'inventions culturelles, telle que la lecture ou le calcul, se fait à partir de cette base naturelle. Pour réaliser certains apprentissages, il est donc parfois nécessaire de travailler à dépasser certaines capacités initiales. Il devient ainsi intéressant de chercher à mieux comprendre comment l'enseignement peut faciliter l'apprentissage, en considérant ces prédispositions. S'inspirant de la relation entre la recherche fondamentale et plusieurs domaines de connaissances, il apparaît que l'éducation pourrait bénéficier de l'éclairage supplémentaire apporté par les connaissances issues des recherches scientifiques.

Par ailleurs, l'enseignement demeure un art pour lequel il ne semble bien entendu pas souhaitable de chercher à appliquer une « recette pédagogique » que l'on estimerait fonctionner pour tous les contextes, sans exception. Cela étant dit, tout comme d'autres domaines s'appuient sur les données probantes pour guider le choix des pratiques à

privilégier, la recherche peut permettre de délimiter un terrain plus fertile à l'apprentissage, en guidant la sélection de certaines pratiques pédagogiques. Cela ne signifie pas qu'il ne faille pas prendre en considération les particularités de chaque élève ou de contextes précis et adapter l'enseignement en conséquence, comme le médecin adapte aussi sa pratique face à chacun de ses patients. En ce sens, une autre analogie intéressante a été proposée par Willingham (2013) qui présente une comparaison entre l'enseignement et l'architecture. Pour construire une maison, l'architecte doit respecter certains principes qui proviennent de la recherche scientifique : les lois de la physique et des matériaux par exemple. Ces principes déterminent un champ de possibilités pour la construction, mais ne dictent pas de quoi la maison aura l'air. La création de la maison se fera également à partir d'un ensemble d'éléments créatifs, émotifs, culturels, etc. qui ne sont pas déterminés par la science, mais par une prise en compte humaine et émotive du contexte. En éducation, les principes issus de la recherche en éducation, psychologie, sociologie, etc. peuvent également délimiter un certain cadre à partir duquel l'enseignant s'adapte à ses élèves et au contexte dans lequel il se trouve et réalise les choix pédagogiques qu'il juge optimaux.

Sur le plan politique, la volonté d'appuyer les pratiques éducatives sur les résultats issus de la recherche se fait sentir dans plusieurs pays. De nombreuses mesures législatives ont été mises en place pour favoriser l'utilisation de pratiques éducatives fondées sur la recherche dans le but de maximiser la réussite scolaire des élèves (Guckert, Mastropieri et Scruggs, 2016). Par exemple, aux États-Unis, la loi scolaire *No Child Left Behind* (NCLB) adoptée en 2001 pour les niveaux primaire et secondaire, dont l'un des principaux objectifs est la réussite de tous les élèves, comprend plus de 100 mentions concernant l'idée d'appuyer les pratiques éducatives sur la recherche scientifique (Bridges, Smeyers et Smith, 2009). L'article 37 de cette loi met d'ailleurs spécifiquement l'accent sur l'importance de prendre appui sur des recherches qui

respectent des critères de rigueur, d'objectivité et de validité. La loi IDEA (*Individual with Disabilities Education Act*, 2004) insiste également sur le fait d'utiliser des pratiques éducatives validées par la recherche auprès des élèves en difficulté. Plusieurs organisations professionnelles reconnues sont aussi d'avis qu'il est nécessaire de mettre de l'avant des pratiques fondées sur la recherche scientifique : le *National Council of Teachers of Mathematics* et le *Council for Exceptional Children*, (2014). En 2002, l'organisme gouvernemental *What Works Clearinghouse* (WWC) a été créé par l'Institut des sciences de l'éducation du Département d'éducation américain afin de fournir une ressource crédible aux décideurs politiques et acteurs du milieu de l'éducation pour orienter leurs choix éducatifs. L'objectif de cet organisme est d'identifier les études scientifiques qui présentent des résultats crédibles et rigoureux concernant l'efficacité d'une pratique pédagogique, d'une intervention, d'un programme ou d'une politique éducative, et de diffuser l'information sous la forme de rapports (Institute for Education Sciences, IES, 2002). Cet organisme compte à ce jour plus de 700 publications disponibles en ligne et propose une base de données contenant plus de 6000 études scientifiques analysées par l'organisme.

Au Québec, les gestes visant à souligner l'importance de la recherche pour le milieu de l'éducation se sont également multipliés dans les dernières années. Depuis 2002, le Centre de transfert pour la réussite éducative au Québec (CTREQ), un organisme gouvernemental provincial, a la mission « de promouvoir l'innovation et le transfert de connaissances en vue d'accroître la réussite éducative au Québec. Ce centre base ses actions sur les pratiques innovantes et les connaissances scientifiques » (CTREQ, 2013). Dans un rapport annuel (2004-2005) sur l'état et les besoins de l'éducation intitulé « Le dialogue entre la recherche et la pratique en éducation : une clé pour la réussite », le Conseil supérieur de l'éducation (2006) propose une réflexion issue de recherches documentaires et d'enquêtes menées auprès des enseignants afin de « favoriser une meilleure utilisation de la recherche et de l'innovation en éducation et

pour améliorer les pratiques éducatives » (p. 5). Cinq grandes orientations sont identifiées dans ce rapport en vue d'accroître la synergie entre la recherche, l'innovation et la pratique en éducation : 1- soutenir la recherche en éducation; 2- soutenir l'innovation en éducation; 3- préparer les enseignants à la recherche; 4- assurer l'accompagnement professionnel des praticiens afin de favoriser l'accès à la recherche et d'encourager les pratiques innovantes et 5- intensifier le transfert de la recherche et la diffusion des savoirs pratiques en éducation.

Dans le cadre de sa stratégie d'action visant la persévérance et la réussite scolaires, le MEES (2009) a également mis sur pied, en partenariat avec le Fonds de recherche du Québec – Société et culture (FRQSC), un programme de recherche visant à « favoriser le développement de connaissances et à permettre au personnel scolaire, aux décideurs et aux gestionnaires de s'approprier et d'appliquer les résultats des recherches ». À ce jour, plus d'une centaine de projets de recherche ont été financés et totalisent un investissement de plus de 10 millions de dollars. Ces projets ciblent tous les ordres d'enseignement (du préscolaire à l'université) et s'intéressent à des thématiques variées.

Ces nombreux exemples, au Québec et ailleurs, mettent en lumière cette volonté politique d'accorder une importance particulière aux résultats de recherche en éducation afin de favoriser l'adoption de pratiques éducatives appuyées sur des données probantes. La progression rapide de ce mouvement au cours des dernières années laisse d'ailleurs entrevoir que d'ici quelques années, plusieurs ressources fiables seront mises à la disposition des éducateurs et des décideurs politiques afin d'éclairer leurs choix (Slavin, 2008).

Sur le plan scientifique, cette volonté a mené à la conduite de recherches en éducation ayant pour objectif d'identifier des pratiques efficaces. Un accroissement du nombre

de recherches visant à évaluer l'efficacité de différentes pratiques éducatives par le biais d'une méthodologie rigoureuse a ainsi pu être observé dans les dernières années (Pasquinelli, 2015). Plus récemment, un nouveau champ de recherche scientifique a vu le jour pour lequel l'identification de pratiques éducatives efficaces passe par une meilleure compréhension des processus cognitifs et cérébraux impliqués dans l'acte d'apprendre (Pasquinelli, 2015). L'intérêt de mieux comprendre les mécanismes cognitifs et cérébraux qui sous-tendent l'apprentissage est discuté plus en détail dans la prochaine section.

1.2 Pertinence de mieux comprendre les mécanismes d'apprentissage

Afin de favoriser l'adoption de pratiques éducatives appuyées par la recherche, il semble pertinent de s'intéresser aux mécanismes cognitifs et cérébraux qui sont impliqués dans différents apprentissages scolaires. En effet, une meilleure compréhension de ces mécanismes et des modifications qui s'opèrent sur ces derniers lors d'un nouvel apprentissage présente plusieurs avantages. Cela offre notamment la possibilité de générer des hypothèses inédites quant aux approches d'enseignement qui seraient à privilégier, en lien avec ces mécanismes. La formulation d'hypothèses permet ainsi de mieux cibler et de préciser les approches d'enseignement à tester en vue d'en mesurer l'efficacité. Une meilleure compréhension des mécanismes cognitifs et cérébraux impliqués dans différents apprentissages permet aussi de comprendre, à un niveau d'analyse plus fondamental, pourquoi certaines approches d'enseignement semblent mieux fonctionner que d'autres.

L'étude des mécanismes impliqués dans l'acte d'apprendre peut être associée au champ des sciences cognitives. Selon Andler (1989), les sciences cognitives sont celles qui « ont pour objet de décrire, d'expliquer et, le cas échéant, de simuler les principales dispositions et capacités de l'esprit humain » (p. 9). Elles s'attachent notamment à

proposer des théories qui sont « susceptibles de s'articuler de façon explicite avec des modèles généraux de l'architecture fonctionnelle de l'esprit et/ou de l'architecture neuronale du cerveau » (Fuchs, 2006). L'expression « sciences cognitives » constitue un champ multidisciplinaire qui inclue notamment la biologie, l'intelligence artificielle, la robotique, la linguistique, la psychologie cognitive ainsi que les neurosciences (Houdé, Kayser, Koenig, Proust et Rastier, 2004; Pasquinelli, 2015; Varela, 1989; Vignaux, 1991), chacune ayant son propre cadre de référence. Ce champ repose donc sur l'étude et la modélisation de phénomènes aussi divers que la perception, l'intelligence, le langage, la mémoire, l'attention, le raisonnement, les émotions ou même la conscience (Houdé *et al.*, 2004). À titre d'exemple, la linguistique a pour objet l'étude du fonctionnement du langage. La discipline de la psychologie cognitive s'attache pour sa part à l'ensemble des activités mentales et cognitives associées aux grandes fonctions psychologiques de l'être humain (perception, attention, mémoire, etc.). L'étude des processus cognitifs peut également se faire dans un contexte plus scolaire en s'intéressant notamment aux mécanismes impliqués dans des apprentissages fondamentaux tels que lire, écrire ou compter (Gentaz et Dessus, 2004).

Les sciences cognitives permettent donc d'informer le monde de l'éducation en jetant un éclairage sur les fonctions mentales qui sont en jeu durant l'apprentissage. En effet, appliquées à l'éducation, les sciences cognitives permettent l'étude de différentes problématiques. Par exemple, elles peuvent permettre d'identifier et de décrire les processus cognitifs généraux mobilisés dans le cadre d'une activité d'apprentissage, c'est-à-dire les mécanismes mis en œuvre par les élèves pour différents apprentissages (p. ex., mathématiques, écriture, lecture, raisonnement scientifique, etc.). Elles peuvent également permettre de vérifier si ces processus sont les mêmes quel que soit l'âge de l'élève ou encore d'évaluer si une approche d'enseignement semble appropriée considérant les processus cognitifs engagés dans une activité (Gentaz et Dessus, 2005).

Considérant la complémentarité de ces disciplines et de leurs objets d'étude respectifs, les sciences cognitives ne sont donc pas associées à une seule méthode de recherche, mais englobent toutes les méthodes relatives aux différentes disciplines susceptibles d'apporter une meilleure compréhension des mécanismes et processus mentaux. Il peut s'agir de l'utilisation de données comportementales (taux de performance, temps de réponse, etc.) obtenues par le biais de questionnaires ou dans le cadre de tâches cognitives précises, d'observations cliniques, de la modélisation mathématique, de techniques de simulations en intelligence artificielle, d'appareils de neuroimagerie, etc. Les temps de réponse (chronométrie mentale), une des méthodologies les plus utilisées en psychologie expérimentale, permettent par exemple d'inférer les processus mentaux d'êtres humains en mesurant le temps dont ils ont besoin pour accomplir des tâches précises, et le nombre d'erreurs qu'ils commettent (Houdé *et al.*, 2004). L'étude des lésions cérébrales permet d'étudier certaines dysfonctions cognitives et, indirectement, de mieux comprendre les structures et processus qui sont impliqués dans le fonctionnement cognitif normal. Ces différentes méthodes constituent autant de moyens pour tenter d'identifier et d'objectiver des mécanismes ou processus mentaux qui, par nature, sont inaccessibles directement.

Parmi les nombreuses disciplines composant le champ des sciences cognitives, celle des neurosciences a connu un développement important depuis les années 90 (Houdé *et al.*, 2004; OCDE, 2007) que l'on nomme souvent la « décennie du cerveau » (Geake et Cooper, 2003). En effet, grâce au développement de techniques d'imagerie cérébrale, dont l'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle (IRMf), et à l'essor des connaissances sur le fonctionnement du cerveau, il est devenu possible d'obtenir des images de l'activité du cerveau *in vivo* lors de la réalisation d'une tâche motrice ou cognitive (Ward, 2010) et d'interpréter ces images afin d'obtenir des informations supplémentaires en lien avec les fonctions cérébrales qui sont sollicitées pour résoudre la tâche. Dès 1989, des chercheurs en sciences cognitives soulignaient d'ailleurs

l'intérêt d'étudier le cerveau pour mieux comprendre ces processus : « [...] ces processus sont représentés, incarnés, dans le système nerveux : ils sont [...] autant de manifestations et d'expressions du fonctionnement du cerveau » (Andler, p. 50). Les neurosciences permettent ainsi de cerner et d'approfondir certains éléments particulièrement importants pour le champ des sciences cognitives, c'est-à-dire ceux qui concernent les relations entre le cerveau et la cognition.

Les progrès en neurosciences ont d'ailleurs mené la communauté éducative à se questionner sur les retombées possibles des connaissances neuroscientifiques pour le domaine de l'éducation en général et, plus spécifiquement, pour l'enseignement (Masson et Brault Foisy, 2014; OCDE, 2007). Cette idée d'étudier des problématiques éducatives en s'appuyant sur les connaissances issues des neurosciences a mené à l'émergence du champ de recherche interdisciplinaire de la neuroéducation. Le terme neuroéducation (Ansari, De Smedt et Grabner, 2012; Battro, Fischer et Léna, 2010; Masson, 2012), introduit par Battro et Cardinali (1996), est surtout connu dans la littérature anglophone sous l'appellation *Mind, Brain and Education* (Fischer, Daniel, Immordino-Yang, Stern, Battro et Koizumi, 2007; Fischer, 2009) ou encore *Educational Neuroscience* (Fischer *et al.*, 2010; Geake, 2009; McCandliss, 2010). L'une des définitions proposées consiste en « l'intégration de diverses disciplines s'intéressant à l'apprentissage et au développement humains, joignant l'éducation, la biologie et les sciences cognitives (traduction libre) » (Fischer *et al.*, 2007, cités par Theodoridou et Triarhou, 2009, p. 119). La neuroéducation s'inscrit directement dans les efforts déployés pour mieux appuyer les pratiques et les politiques éducatives sur les données issues de la recherche (Fischer, 2009; Fischer *et al.*, 2010; Goswami, 2008; OCDE, 2007; Pasquinelli, 2011; Royal Society, 2011).

Les recherches menées en neuroéducation se distinguent des recherches en neurosciences, car leur but premier n'est pas de mieux comprendre le cerveau humain, mais plutôt d'apporter des données probantes issues des neurosciences, complémentaires aux données comportementales habituellement utilisées en éducation, et permettant de fournir des informations complémentaires et supplémentaires à certaines problématiques qui sont propres au milieu de l'éducation. Ultimement, rendre les données cérébrales utiles au milieu de l'éducation fait donc partie intégrante des objectifs poursuivis par la neuroéducation. En introduisant la variable de l'activité cérébrale dans la recherche en éducation, la neuroéducation a ainsi pour objectif d'apporter un lot de connaissances supplémentaires sur les mécanismes cérébraux mobilisés et de les mettre en relation avec les données comportementales plus traditionnelles (performance, temps de réponse, etc.) pour établir un pont entre les connaissances sur le fonctionnement du cerveau et les mécanismes liés à l'apprentissage et à l'enseignement (Masson, 2012; Masson et Brault Foisy, 2014).

En ce sens, l'apport des neurosciences au domaine de l'éducation permet de jeter un nouvel éclairage sur la « boîte noire » de l'apprentissage (Fischer *et al.*, 2010) en identifiant les processus cérébraux impliqués dans certains apprentissages scolaires ou encore en analysant les effets de certaines interventions pédagogiques sur le fonctionnement du cerveau (Goswami, 2006; Masson, 2012). Plusieurs chercheurs mettent aussi de l'avant l'idée qu'une meilleure compréhension du cerveau pourrait ultimement aider à mieux enseigner (Masson, 2014; Pasquinelli, 2011; Spitzer, 2012).

Après un peu plus d'une quinzaine d'années d'existence, la neuroéducation et les recherches en neuroscience apportent déjà des informations intéressantes pour le domaine de l'éducation. Il a été clairement démontré que l'apprentissage modifie la structure et le fonctionnement du cerveau, une propriété que l'on appelle la plasticité cérébrale (OCDE, 2007; Pascual-Leone, Amedi, Fregni et Merabet, 2005). Des

recherches récentes utilisant les neurosciences ont également permis d'observer que la structure et le fonctionnement du cerveau peuvent poser des contraintes à la façon dont différents apprentissages scolaires peuvent se réaliser (Dehaene, 2010; Houdé, 2014; Masson, 2014; Masson et Brault Foisy, 2014), les rendant ainsi possiblement plus difficiles. Ces apprentissages scolaires difficiles peuvent constituer des obstacles à la réussite scolaire des élèves. Cela laisse entendre que le fait de mieux comprendre les contraintes cérébrales qui sont associées à différents apprentissages scolaires pourrait fournir des pistes intéressantes afin de mieux comprendre pourquoi ces apprentissages sont plus difficiles et ultimement permettre d'adapter l'enseignement à ces contraintes. Comparativement aux autres disciplines des sciences cognitives, celle des neurosciences présente en ce sens l'avantage de permettre une observation plus directe et ultimement une meilleure prise en compte de ces contraintes cérébrales associées à l'apprentissage et à l'enseignement. C'est précisément de cette idée dont il est question à la section suivante.

1.3 Importance de mieux comprendre les contraintes cérébrales associées à l'apprentissage et à l'enseignement

Cette découverte selon laquelle les caractéristiques du cerveau des élèves rendent certains apprentissages plus difficiles mène à penser qu'il est important de préconiser des approches d'enseignement adaptées au fonctionnement et à l'organisation du cerveau des élèves. Les neurosciences peuvent ainsi informer le monde de l'éducation en permettant d'étudier plus directement les contraintes cérébrales associées à différents apprentissages scolaires. Une meilleure connaissance de ces contraintes pourrait permettre d'identifier les approches d'enseignement qui semblent plus efficaces au regard de ces contraintes et contribuer ainsi à la réussite scolaire des élèves.

Afin de mieux comprendre cette idée de contrainte cérébrale, il importe de discuter

brièvement des principaux mécanismes impliqués dans l'apprentissage. La relation entre les neurosciences et l'éducation s'articule notamment autour de deux éléments centraux. Le premier élément concerne la plasticité cérébrale, c'est-à-dire la capacité du cerveau à s'adapter en modifiant son activité et ses connexions neuronales lors de l'apprentissage (OCDE, 2007; Pascual-Leone *et al.*, 2005). Longtemps, il a été considéré que le cerveau se développait au début de la vie et qu'ensuite, sa structure était définie et qu'elle demeurait stable (OCDE, 2007). Or, nous savons aujourd'hui que cette idée est inexacte. En effet, bien qu'il soit vrai que le cerveau est particulièrement malléable au cours de la petite enfance, celui-ci conserve la capacité de modifier son fonctionnement et sa structure tout au long de la vie pour s'adapter à différents contextes et pour développer de nouvelles habiletés (OCDE, 2007; Ward, 2010). Sans cette flexibilité, aucun apprentissage scolaire ne serait possible.

Il est d'ailleurs aujourd'hui bien démontré que les apprentissages scolaires, comme tout type d'apprentissage, modifient le fonctionnement et la structure du cerveau des apprenants (Dehaene *et al.*, 2010; Kwok *et al.*, 2011). En effet, durant l'apprentissage, certaines connexions qui ne sont pas utiles peuvent ainsi être éliminées, de nouvelles connexions peuvent être créées et l'efficacité de certaines connexions déjà existantes peut être modulée à la hausse ou à la baisse, selon leur importance (Geake et Cooper, 2003; OCDE, 2007). En modifiant et en optimisant ses connexions neuronales, le cerveau devient également plus spécialisé : certaines régions cérébrales prennent ainsi en charge des fonctions cognitives bien précises (OCDE, 2007; Ward, 2010). La structure et le fonctionnement du cerveau ne sont donc pas fixes, mais plutôt flexibles. Il devient alors pertinent d'identifier et de chercher à mieux comprendre ce qui caractérise différents apprentissages scolaires sur le plan cérébral.

Par ailleurs, bien que la plasticité cérébrale constitue une condition *sine qua non* pour établir un pont entre les domaines de l'éducation et des neurosciences (Masson et

Brault Foisy, 2014), la pertinence de mener des recherches en neuroéducation demeurerait limitée si le cerveau était flexible au point de pouvoir se modifier et apprendre avec autant de facilité, quel que soit le type d'intervention pédagogique mise en place (Dehaene, 2008). Or, un deuxième élément permet de mieux comprendre les retombées éducatives des recherches sur le cerveau. En effet, des chercheurs ont mis en évidence que la plasticité cérébrale ne serait pas infinie et présenterait certaines limites (Dehaene, 2008; Houdé, 2014; Masson, 2014; Masson et Brault Foisy, 2014). Elle serait influencée par différentes contraintes, en particulier par la structure et l'organisation initiale du cerveau, c'est-à-dire son architecture cérébrale préalable à l'apprentissage (Dehaene, 2008). La relation entre le cerveau et l'apprentissage est donc bidirectionnelle : l'apprentissage modifie le fonctionnement du cerveau en raison de sa plasticité, mais, réciproquement, le cerveau impose des contraintes à la façon dont certains apprentissages peuvent se réaliser.

Cette idée de « contraintes » découle du fait qu'avant même qu'un nouvel apprentissage ne se réalise, le cerveau présente une architecture initiale qui découle notamment de l'évolution ainsi que de facteurs épigénétiques et qui est très similaire d'une personne à l'autre (Dehaene, 2005). Cette façon dont le cerveau est structuré et organisé avant l'apprentissage aurait un impact sur la façon dont certains apprentissages pourraient s'accomplir sur le plan cérébral.

Par exemple, le cerveau possède des réseaux de neurones très solidement établis qui peuvent parfois poser des contraintes à la réalisation d'un nouvel apprentissage. En sciences notamment, plusieurs recherches indiquent qu'avant même leur entrée à l'école, les élèves possèdent souvent des conceptions non scientifiques par rapport à plusieurs phénomènes naturels qui sont particulièrement difficiles à faire évoluer dans le cadre d'un enseignement formel (Carey, 2000; Liu, 2001; Potvin, 2013). Des recherches récentes suggèrent que certaines conceptions non scientifiques ne

disparaîtraient peut-être jamais du cerveau des élèves, parce qu'elles découleraient d'intuitions fondamentales inscrites dans le cerveau sous la forme de réseaux de neurones très ancrés et qui ne peuvent sans doute pas être modifiés (Masson, Potvin, Riopel et Brault Foisy, 2014; Potvin, 2013; Potvin, Masson, Lafortune et Cyr, 2014). Cela s'explique notamment par le fait que certaines idées qui ne sont pas en accord avec les conceptions reconnues par la communauté scientifique peuvent s'avérer suffisamment efficaces dans de nombreux contextes du quotidien. Par exemple, l'intuition selon laquelle « plus on se rapproche d'une source de chaleur, plus il fait chaud » est vraie et utile, notamment car elle peut permettre de prévenir une brûlure. Cependant, cette intuition peut également mener à une explication non scientifique du phénomène des saisons selon laquelle il ferait plus chaud l'été parce que la Terre serait plus près du Soleil. Cet exemple permet d'illustrer pourquoi les réseaux de neurones associés à une intuition initiale sont difficilement modifiables et peuvent poser un défi supplémentaire lors de l'apprentissage des sciences.

En effet, pour apprendre les sciences, les élèves devraient alors apprendre à contrôler et à résister à ces intuitions (à bloquer l'utilisation des réseaux de neurones préexistants) en ayant recours à des régions cérébrales liées à l'inhibition, c'est-à-dire la capacité du cerveau à contrôler ses intuitions et ses habitudes spontanées en nuisant à l'activation des réseaux de neurones responsable de ces intuitions et habitudes (Masson *et al.*, 2014; Brault Foisy, Masson, Potvin et Riopel, 2015). Dans cet exemple, l'architecture cérébrale initiale de l'élève joue donc un rôle déterminant dans l'apprentissage parce qu'elle vient influencer et contraindre la façon dont certains apprentissages qui entrent en compétition avec les réseaux de neurones préexistants peuvent prendre place dans le cerveau. Dans ce cas précis, apprendre exige un effort supplémentaire puisqu'il nécessite de bloquer l'activation spontanée des réseaux neuronaux qui ne sont pas appropriés.

Un autre exemple de contrainte cérébrale liée à l'apprentissage concerne le fait que des régions précises du cerveau seraient possiblement mieux disposées que d'autres à prendre en charge certaines fonctions cognitives, c'est-à-dire à accueillir certains apprentissages associés à des inventions culturelles tels que ceux liés à la lecture et au calcul. Ces régions constitueraient des niches privilégiées (Dehaene et Cohen, 2007) pour accueillir certains apprentissages en raison de leur localisation dans le cerveau, de leurs connexions déjà établies avec d'autres régions cérébrales ou encore parce qu'elles accomplissent déjà une fonction similaire (Goswami, 2008). Cette idée selon laquelle la fonction initiale d'une région cérébrale est modifiée pour acquérir de nouvelles compétences est souvent désignée par le terme « recyclage neuronal » (Dehaene, 2005; Dehaene et Cohen, 2007). Le recyclage neuronal (Dehaene, 2007) implique qu'en raison de la façon dont le cerveau est organisé (c'est-à-dire la façon dont les neurones sont interconnectés les uns aux autres), ce dernier présente des prédispositions pour se modifier d'une certaine façon plutôt que d'une autre durant l'apprentissage. En effet, cette contrainte du recyclage neuronal s'appuie sur le fait que les capacités d'adaptation des neurones ne seraient pas infinies et demeureraient liées aux contraintes biologiques (Dehaene, 2007). Dans cet autre exemple, apprendre exige donc un effort particulier puisqu'il nécessite de reconfigurer une partie des réseaux neuronaux d'une région du cerveau afin de les dédier à un nouvel usage. Les apprentissages nécessitant du recyclage neuronal ne sont donc pas faciles parce qu'ils nécessitent une transformation relativement importante de l'architecture initiale du cerveau de l'élève.

Malgré l'étonnante flexibilité du cerveau, ces contraintes laissent donc entendre qu'il ne serait pas possible de tout apprendre de n'importe quelle façon. La structure initiale de l'organisation cérébrale poserait un cadre délimitant un éventail de possibilités pouvant contraindre certains apprentissages scolaires. Certaines approches d'enseignement seraient ainsi potentiellement plus compatibles que d'autres avec l'architecture initiale du cerveau (Dehaene, 2007). La relation bidirectionnelle entre

cerveau et apprentissage met donc en lumière la pertinence, pour le domaine de l'éducation, de vouloir intégrer les connaissances neuroscientifiques à l'étude de certaines problématiques éducatives, d'abord parce que l'apprentissage modifie la façon dont le cerveau fonctionne et, de surcroît, parce que l'architecture initiale du cerveau peut imposer des contraintes à la façon dont certains apprentissages peuvent se réaliser. Cette idée de contraintes associées à l'architecture préalable du cerveau a ainsi mené des chercheurs à formuler l'hypothèse selon laquelle certains apprentissages scolaires seraient plus difficiles que d'autres, c'est-à-dire exigeraient un effort supplémentaire, en raison des contraintes cérébrales qui leur sont associées (Dehaene, 2008; Dehaene, Cohen, Sigman et Vinckier, 2005; Masson et Brault Foisy, 2014).

Cette découverte selon laquelle l'architecture cérébrale initiale (Dehaene, 2008) des élèves influence les apprentissages futurs peut être rapprochée de l'idée constructiviste voulant que les connaissances antérieures jouent un rôle important dans l'acquisition de nouvelles connaissances. Tout comme il est utile pour les enseignants de connaître les connaissances antérieures des élèves pour mieux leur enseigner, mieux connaître la structure et le fonctionnement du cerveau des élèves pourrait également aider les enseignants à comprendre pourquoi certains apprentissages scolaires sont plus difficiles et, surtout, à choisir et mettre en place des approches d'enseignement mieux adaptées à l'organisation et au fonctionnement du cerveau des élèves. La prochaine section poursuit cette réflexion sur la relation entre les contraintes cérébrales et l'enseignement.

1.4 Prise en compte des contraintes cérébrales dans le choix des approches d'enseignement

Savoir que l'apprentissage modifie l'architecture du cerveau et que l'architecture cérébrale influence l'apprentissage est certes très intéressant pour le domaine de

l'éducation, mais serait de peu d'utilité si les enseignants et les autres intervenants du domaine de l'éducation ne pouvaient pas, par les choix pédagogiques qu'ils font, avoir un effet sur ces contraintes cérébrales et faciliter la mise en place de certains apprentissages sur le plan cérébral (Dehaene, 2007; Masson et Brault Foisy, 2014). Il devient donc intéressant de se questionner à savoir si la prise en compte des contraintes cérébrales dans le choix des approches d'enseignement qui sont mises en place peut avoir une incidence sur l'apprentissage et sur les modifications cérébrales qui découlent de cet apprentissage.

Plusieurs chercheurs ont ainsi commencé à explorer cette idée que la prise en compte des contraintes cérébrales pourrait mener à l'adoption d'approches d'enseignement qui influencent différemment le fonctionnement du cerveau (Delazer *et al.*, 2005; Houdé *et al.*, 2001; Van Duijvenvoorde, Zanolie, Rombouts, Raijmakers et Crone, 2008; Yoncheva, Blau, Maurer et McCandliss, 2010). Les premiers résultats de recherche explorant cette idée laissent entendre que des approches d'enseignement différentes amènent les élèves à mobiliser des processus cognitifs particuliers et donc à solliciter des régions spécifiques de leur cerveau.

Un exemple concret associé à cette idée concerne l'espacement des périodes d'apprentissage. Plusieurs études montrent en effet que le fait d'espacer les périodes d'apprentissage facilite considérablement l'apprentissage, notamment en termes de performance et de rétention de l'information (Kornell, 2009). Sur le plan cérébral, l'espacement est étroitement lié à la plasticité cérébrale puisque le fait d'espacer les périodes d'apprentissage permet de consolider les connexions neuronales. Or, les mécanismes de plasticité cérébrale exigent un certain temps pour se mettre en place. Il s'agit d'une contrainte cérébrale qui ne découle pas de l'architecture cérébrale initiale, mais plutôt des mécanismes biochimiques de plasticité et de consolidation des connexions cérébrales (Smolen, Zhang et Byrne, 2016). En espaçant les périodes

associées à un même contenu d'apprentissage sur plusieurs jours, davantage de temps et de périodes de sommeil sont accordés au cerveau pour consolider les apprentissages et les connexions neuronales. Durant le sommeil, le cerveau réactive les réseaux de neurones liés aux apprentissages réalisés récemment (Antony, Gobel, O'Hare, Reber et Paller, 2012). Les neurones qui s'activent pendant que l'on dort renforcent ainsi leurs interconnexions. Dormir permet donc de consolider les apprentissages par une réactivation spontanée et inconsciente des réseaux de neurones en lien avec ces apprentissages.

Le fait d'espacer les périodes d'apprentissages mène également à une plus grande activation du cerveau. En effet, si l'on réalise quatre périodes d'apprentissage l'une après l'autre, le cerveau s'active beaucoup moins aux dernières périodes d'apprentissage comparativement aux premières (Callan et Schweighofer, 2010). Au contraire, si l'on espace les quatre périodes d'apprentissage, l'intensité de l'activité cérébrale est maintenue durant les quatre périodes, ce qui a probablement pour effet de contribuer à un plus grand apprentissage et à une meilleure consolidation des réseaux de neurones qui lui sont associés. Pour apprendre, le cerveau doit s'activer, et espacer les périodes d'apprentissage semble contribuer à cette activation.

Cet exemple de l'espacement permet d'illustrer que le fait d'adapter l'enseignement aux contraintes cérébrales peut avoir un impact sur le fonctionnement cérébral et sur l'apprentissage. Dans ce cas précis, les mécanismes de plasticité cérébrale permettant la consolidation des réseaux de neurones associés à un apprentissage exigent du temps. Le fait d'adapter l'enseignement à cette contrainte en espaçant les périodes d'apprentissages permet ainsi de faciliter cette consolidation.

Des exemples en lien avec d'autres contraintes cérébrales sont également présents dans la littérature scientifique. On sait notamment que le cerveau pose certaines contraintes

à l'apprentissage en raison de ses mécanismes de développement et de maturation. La maturation progressive du cortex préfrontal et des mécanismes cérébraux de correction d'erreur jusqu'au début de l'âge adulte est notamment associée à une plus grande sensibilité du cerveau adulte à la rétroaction négative. Considérant ces mécanismes, le fait de donner une rétroaction positive ou négative à l'apprenant n'aura pas le même impact sur le fonctionnement cérébral et l'apprentissage, selon son âge (Van Duijvenvoorde *et al.*, 2008). Cette compréhension des mécanismes liés au développement cérébral peut donc avoir un impact sur la façon d'utiliser efficacement les types de rétroaction en vue de soutenir l'apprentissage.

À la section 1.3, il a aussi été question de la contrainte associée aux réseaux de neurones préexistants et solidement ancrés auxquels il est parfois nécessaire de résister pour réaliser un nouvel apprentissage. Il semblerait que pour certains apprentissages contre-intuitifs qui nécessitent de faire preuve d'inhibition, le fait de mettre en place des alertes durant l'enseignement afin de prévenir l'apprenant de la présence d'un piège pourrait favoriser la mise en place des mécanismes d'inhibition et faciliter le nouvel apprentissage (Houdé *et al.*, 2001).

Ces premiers résultats laissent ainsi entendre que le fait de mettre en place des approches d'enseignement qui sont adaptées aux contraintes cérébrales pourrait faciliter certains apprentissages. Cette idée met donc en lumière la pertinence d'étudier les effets des approches d'enseignement qui prennent en compte les contraintes cérébrales afin de mieux comprendre leurs incidences respectives au niveau du cerveau et de l'apprentissage. À cette fin, l'utilisation de l'imagerie cérébrale présente un avantage considérable. En permettant de « visualiser directement l'activité du cerveau d'une personne volontaire au moment même où celle-ci effectue une opération mentale » (Dehaene, 2007, p. 101), il devient d'une part possible de connaître plus directement les mécanismes associés à un apprentissage pour différentes approches

d'enseignement et, d'autre part, de comprendre pourquoi, sur le plan cérébral, certaines approches d'enseignement semblent avoir plus de succès que d'autres.

Cependant, bien que le lien entre certaines contraintes cérébrales et l'enseignement ait déjà été exploré, les effets de différentes approches d'enseignement sur le fonctionnement cérébral, dans le cadre d'apprentissages qui nécessitent du recyclage neuronal, demeurent très peu connus (Yoncheva *et al.*, 2010). Pourtant, ce mécanisme est l'un des plus importants et est associé à des apprentissages scolaires fondamentaux. Le recyclage neuronal serait possiblement impliqué dans tous les apprentissages liés à une invention de nature culturelle et pour lesquels il n'est pas possible que des mécanismes cérébraux soient présents dès la naissance (Dehaene, 2008), notamment les apprentissages de base que sont la lecture (invention du système d'écriture) ainsi que le calcul simple (invention du système numérique symbolique), mais aussi possiblement les sciences (Mason et Just, 2016), la géographie, l'histoire, la grammaire et la philosophie (Dehaene, 2008).

1.5 Question de recherche

La problématique à l'origine de ce projet de recherche émerge d'abord du constat suivant : l'une des pistes mises de l'avant pour favoriser la réussite scolaire des élèves consiste à mettre en place des pratiques éducatives qui s'appuient sur les résultats de recherches probants en éducation. Pour ce faire, il semble pertinent de chercher à s'intéresser aux mécanismes cognitifs et cérébraux qui sont impliqués dans différents apprentissages scolaires afin d'obtenir une compréhension plus fondamentale de la façon dont se réalisent ces apprentissages et des effets que peuvent avoir différentes approches d'enseignement. En effet, une compréhension plus approfondie des mécanismes associés à différents apprentissages pourrait fournir des pistes permettant de préciser ou d'orienter certains choix pédagogiques. Plus spécifiquement, le domaine

de la neuroéducation propose d'établir un pont entre les connaissances sur le fonctionnement du cerveau et les mécanismes liés à l'apprentissage et à l'enseignement. De récentes recherches en neuroéducation ont montré que, bien que le cerveau fasse preuve d'une grande plasticité, le fonctionnement ainsi que la structure et l'organisation initiale du cerveau posent des contraintes à l'apprentissage. Ces contraintes peuvent rendre certains apprentissages plus difficiles à réaliser et faire obstacle à la réussite scolaire. Cela mène donc à penser qu'il devient important de réfléchir et d'adapter l'enseignement de façon à ce qu'il prenne en considération le fonctionnement et l'organisation du cerveau des élèves. Or, malgré que le lien entre certaines contraintes cérébrales et l'enseignement ait déjà été étudié, les effets de différentes approches d'enseignement sur le fonctionnement cérébral, dans le cadre d'apprentissages qui nécessitent du recyclage neuronal, demeurent très peu documentés.

Afin d'apporter de nouveaux éléments de connaissance à ce sujet, ce projet de recherche a comme objectif de répondre à la question suivante : est-ce que des approches d'enseignement distinctes qui sont associées à un apprentissage nécessitant du recyclage neuronal peuvent avoir un impact différent sur le fonctionnement cérébral et sur le recyclage neuronal? Ce projet s'inscrit donc principalement dans une perspective de recherche fondamentale puisqu'il vise à approfondir notre compréhension de la relation entre l'enseignement et le fonctionnement cérébral, sans toutefois avoir l'ambition que les résultats qui en découleront puissent avoir une application immédiate pour le milieu de l'éducation.

Les incidences possibles d'une réponse positive à cette question laissent néanmoins entrevoir un éclairage supplémentaire à l'enseignement des objets d'apprentissage qui nécessitent de mettre en place du recyclage neuronal. En effet, cela signifierait que l'enseignement peut influencer le fonctionnement cérébral et, plus précisément, que

des approches distinctes ont des impacts différents, observables non seulement sur le plan comportemental, ce qu'a déjà étudié et démontré par un grand nombre de recherches dans plusieurs contextes d'apprentissage, mais également sur le plan cérébral. Cela laisserait ainsi entendre que les différences souvent observées en termes de performance, de progrès, de rapidité, etc., entre différentes approches d'enseignement seraient potentiellement attribuables à leur impact respectif, sur le plan du fonctionnement cérébral. Plus précisément, ces différences comportementales pourraient être dues au fait que certaines interventions permettent de mobiliser davantage des mécanismes cognitifs et cérébraux, tel que le recyclage neuronal, permettant ainsi de mieux « surmonter » les contraintes associées à l'architecture initiale du cerveau. Par ailleurs, il est aussi possible que certaines approches ou interventions pédagogiques engendrent des résultats similaires sur le plan comportemental (p. ex., au niveau de la performance), mais aient pourtant des effets différents sur le plan cérébral (Sohn, 2004). Pour de tels cas, le niveau d'analyse cérébral devient particulièrement intéressant, parce qu'il permet de mettre en lumière les mécanismes qui sont mobilisés pour différentes approches d'enseignement et de comprendre plus finement, à la lumière des connaissances neuroscientifiques, l'impact distinct de ces approches.

Cette recherche vise donc à faire un pas de plus vers une meilleure compréhension de la relation entre l'enseignement et le fonctionnement cérébral, plus précisément des contraintes cérébrales associées à différents apprentissages et pour lesquels le mécanisme du recyclage neuronal est nécessaire. Elle permettra notamment de vérifier si le fait de mettre en place un enseignement adapté aux contraintes cérébrales pour un apprentissage nécessitant de faire preuve de recyclage neuronal peut contribuer à la mise en place de cet apprentissage sur le plan cérébral.

CHAPITRE II

CADRE THÉORIQUE

Deux concepts permettant de mieux comprendre les liens entre le cerveau, l'apprentissage et l'enseignement sont explicités dans le cadre de ce chapitre : le concept de plasticité cérébrale et celui de recyclage neuronal. Le concept de plasticité cérébrale est d'abord présenté, puisqu'il sert de point d'ancrage au concept plus spécifique du recyclage neuronal. Puis, le concept de recyclage neuronal est abordé afin d'en comprendre les origines et la signification, principalement au regard de l'éducation. À la suite de la présentation de ces deux concepts, une recension des écrits scientifiques portant sur le recyclage neuronal est proposée dans lequel les mécanismes cérébraux associés au recyclage neuronal sont discutés pour plusieurs apprentissages scolaires. S'ensuit une présentation des principales recherches ayant étudié les effets de l'enseignement sur le recyclage neuronal. Puis, le chapitre se termine par la présentation de l'hypothèse de recherche.

2.1 Rôle du mécanisme de recyclage neuronal dans l'apprentissage

2.1.1 Concept de plasticité cérébrale

De façon générale, l'idée de plasticité réfère à la capacité de quelque chose à se modifier ou se transformer. Le dictionnaire Larousse (2017, en ligne) propose la définition suivante du concept de plasticité : « qualité de ce qui est souple, modifiable ». De façon similaire, le *Oxford English Dictionary* (2017) indique qu'il

s'agit de « la qualité de ce qui peut facilement être façonné ou modelé » (en ligne, traduction libre). Dans le contexte spécifique de la biologie, ce même dictionnaire propose également la définition suivante : « La capacité d'un organisme de s'adapter en fonction de changements dans son environnement » (traduction libre). Ces définitions convergent principalement vers l'idée d'une modification et certaines, de façon implicite ou explicite, mettent aussi en lumière l'idée selon laquelle des facteurs externes pourraient avoir une influence sur la modification qui s'opère, notamment par le biais des expériences vécues au sein d'un environnement donné.

Le concept de plasticité a été introduit pour la première fois dans le champ des neurosciences en 1890 par William James dans le traité des principes de psychologie (*Principles of Psychology*) (Berlucchi et Buchtel, 2009; Pascual-Leone *et al.*, 2005). Dans cet ouvrage, il établit le premier lien entre l'idée de plasticité du cerveau et les comportements humains. Il affirme ainsi que : « les habitudes comportementales chez les êtres humains sont dues à la plasticité des matériaux organiques (particulièrement les tissus du système nerveux) dont leur corps est composé » (vol. I, p. 105, traduction libre). Il introduit également l'idée selon laquelle le système nerveux serait constitué d'un ensemble de chemins à travers lesquels circule l'information et la plasticité consisterait en la modification de ces chemins. On réfère depuis à cette idée de plasticité relative au fonctionnement et à la structure du cerveau par les termes de plasticité cérébrale (OCDE, 2007) ou de neuroplasticité (en anglais, *neural plasticity* ou *brain plasticity*) (López-Escribano et Moreno, 2014). Les origines et l'évolution du concept de plasticité cérébrale ont fait l'objet de discussions et d'analyses depuis plus d'un siècle, dans le cadre de plusieurs ouvrages et articles (Berlucchi et Buchtel, 2009; Buchtel, 1978; Cooke et Bliss, 2006; Johansson, 2004; Pascual-Leone *et al.*, 2005). À la suite de l'introduction du concept de plasticité au champ des neurosciences par William James, ce concept s'est précisé graduellement à la lumière des nouvelles découvertes scientifiques relatives au fonctionnement du système nerveux telles que la

théorie du neurone selon laquelle des cellules individualisées (les neurones) constitueraient les éléments de base du tissu nerveux (Ramón et Cajal, 1894) ainsi que la découverte de la synapse (le point de jonction entre deux neurones où se transmet l'influx nerveux) (Sherrington, 1897). Une compréhension plus approfondie du concept de plasticité s'est ainsi développée, suscitant d'abord une réflexion nouvelle quant aux bases de la pensée humaine, puis en lien avec l'apprentissage (Ramón et Cajal, 1895; DeFelipe, 2006). Des hypothèses ont été formulées selon lesquelles le développement de certaines aptitudes ou habiletés, notamment par l'éducation, serait en lien avec l'organisation du système nerveux, plus précisément avec la façon dont les neurones interagissent et communiquent entre eux: « [...] la gymnastique cérébrale associée à l'exercice mental serait apte à modifier les patrons des connexions entre les neurones » (Berlucchi et Buchtel abordant la perspective et les travaux de Cajal, 2009, p. 312, traduction libre).

Les connaissances sur le cerveau ont depuis connu un essor considérable. Le nombre total de neurones du cerveau humain est aujourd'hui estimé entre 86 milliards (Azevedo *et al.*, 2009; Dehaene, 2014) et 100 milliards (Kandel, Schwartz et Jessell, 2000; Ward, 2010), chaque neurone étant connecté à d'autres neurones par 1 000 à 10 000 connexions (Dehaene, 2014; Ward, 2010). Ces connexions sont possibles parce que les neurones disposent de prolongements, les dendrites et l'axone, leur permettant de communiquer entre eux, par le biais de signaux électrochimiques (les influx nerveux). Les neurones peuvent à la fois recevoir et envoyer des influx nerveux à d'autres neurones. Le cerveau constitue ainsi un inextricable réseau de communication. Les réseaux de neurones au sein desquels prend place cette communication, qui sont situés dans différentes régions du cerveau, sont associés à des fonctions cognitives ou des états mentaux distincts : sensations, émotions, comportements, actions motrices, conscience, mémoire, sommeil, attention, etc. (Caramazza et Coltheart, 2006; Ward, 2010). Le système nerveux de l'humain est ainsi formé d'un nombre impressionnant

de réseaux de neurones, enchâssés les uns dans les autres, qui assurent des fonctions spécialisées. Or, tel que le proposait déjà Cabral à la fin du 19^e siècle, les réseaux de neurones ne constituent pas des entités figées et fixes : ils se façonnent plutôt selon nos expériences de vie et peuvent même se réorganiser de façon substantielle lorsqu'il semble nécessaire de pallier certaines difficultés ou déficits (Dehaene, 2014, López-Escribano et Moreno, 2014). Plusieurs cas documentés dans la littérature scientifique ont en effet permis de constater l'importante plasticité du cerveau humain. Par exemple, des gens ayant subi une lésion cérébrale dans une région précise du cerveau réussissent à retrouver, à différents degrés, les habiletés qu'ils avaient perdues à la suite de cette lésion, selon la gravité de celle-ci et le moment à laquelle elle survient (Ballantyne, Spilkin, Hesselink et Trauner, 2008; Robertson et Murre, 1999). Des patients ayant subi une opération visant à leur retirer un hémisphère complet du cerveau (droit ou gauche), généralement dans le but de mettre fin en dernier recours à des épisodes épileptiques très intenses, réussissent tout de même à développer des compétences qui sont pourtant fortement associées à des régions cérébrales qui leur ont été retirées (p. ex : langage, créativité, émotions, mémoire, habiletés motrices, etc.) (Van Empelen, Jennekens-Schinkel, Van Rijen, Helders et Van Nieuwenhuizen, 2005; Liégeois, Connelly, Baldeweg et Vargha-Khadem, 2008; López-Escribano et Moreno, 2014; Vargha-Khadem *et al.*, 1997). D'autres écrits présentent aussi de quelle façon le cerveau de personnes aveugles réorganise certaines de ses connexions neuronales de façon à intégrer l'apprentissage du langage Braille (Gizewski, Gasser, De Greiff, Boehm et Forsting, 2003; Pascual-Leone et Torres, 1993). Le cerveau humain possède donc un très grand potentiel de réorganisation (voir concept de *functional reorganization* introduit par Luria, 1963 et discuté dans Luria, Naydin, Tsvetkova et Vinarskaya, 1975) lui permettant de s'adapter le mieux possible aux demandes de son environnement, et même de suppléer, complètement ou partiellement, à certains déficits.

Sur le plan neuronal, la plasticité consiste donc en la modification des connexions entre les neurones du cerveau. Ward (2010) en propose la définition suivante : « [...] la capacité du cerveau de changer les connexions entre les neurones en fonction des expériences vécues [...] tout au long de la vie » (p. 181). Il est ainsi aujourd'hui reconnu par la communauté scientifique que le cerveau n'est pas un organe fixe et immuable (OCDE, 2007), et bien que la capacité de réorganisation du cerveau du bébé et de l'enfant soit particulièrement importante, cette capacité à se modifier se poursuit rendant l'apprentissage possible durant la vie entière (Dehaene, 2014; Ward, 2010). De nos jours, la plasticité est reconnue comme étant le mécanisme fondamental, sinon le seul, permettant d'induire des changements qui sont observables sur le plan comportemental (Berlucchi et Buchtel, 2009). En effet, l'agencement particulier des connexions neuronales joue un rôle crucial dans le fonctionnement du cerveau, c'est-à-dire dans l'activation ou non de certains neurones, et influence ultimement les fonctions cognitives qui s'accomplissent (ODCE, 2007).

Or, plusieurs facteurs déterminent comment s'établissent ces connexions (Singer, 2008). D'abord, l'évolution de l'espèce humaine semble avoir joué un rôle relativement important dans la détermination des grandes structures du cerveau humain. En plus d'avoir eu une incidence sur la configuration générale du cerveau, certains chercheurs croient également que certaines connexions neuronales (ou des prédispositions à former certaines connexions neuronales) pourraient être issues de l'évolution (Singer, 2008, p. 99). En plus ce facteur lié à l'évolution, la façon dont le cerveau se développe a également une influence importante sur la façon dont sont connectés les neurones. Sous l'influence des premières expériences vécues par le fœtus *in utero* et au cours des premières années de vie suivant la conception, une période très intense de création de nouvelles connexions neuronales (appelée synaptogénèse) prend place (Huttenlocher et Dabholkar, 1997). Celle-ci est suivie d'une période d'élagage se poursuivant pendant plusieurs années et durant laquelle les connexions qui ne sont pas suffisamment utiles

sont éliminées (OCDE, 2007; Ward, 2010). L'âge et l'expérience de chaque individu font en sorte que seules les connexions qui sont les plus fonctionnelles et les plus efficaces se stabilisent et demeurent tandis que les autres dégèrent (un processus aussi qualifié d'« épigénèse par stabilisation sélective des neurones et des synapses » par le neurobiologiste Jean-Pierre Changeux, 1983). Ces deux facteurs, l'évolution et le développement biologique, sont fortement liés à une composante génétique, elle-même influencée par l'environnement (épigénétique). Or, en plus de ces facteurs, un troisième élément a également un impact considérable sur les connexions neuronales qui s'établissent dans le cerveau. En effet, les apprentissages qui sont faits tout au cours de la vie influencent de façon importante la façon dont les neurones sont connectés entre eux et ont donc un impact sur la structure et le fonctionnement du cerveau. L'apprentissage n'est donc pas uniquement un phénomène psychique ; il s'agit aussi d'un phénomène biologique qui modifie physiquement les connexions entre les neurones du cerveau. Vu sous l'angle inverse, l'apprentissage n'est possible que parce que le cerveau présente la capacité de modifier ses connexions pour intégrer de nouvelles informations ou habiletés.

La compréhension des règles qui régissent la connexion et la mise en réseaux de neurones durant l'apprentissage remontent aux travaux fondateurs de Donald Hebb (1949). Dans un ouvrage intitulé *The Organization of Behavior : A Neuropsychological Theory (1949)*, celui-ci a proposé un principe permettant d'expliquer de quelle façon et sous quelles conditions de nouvelles connexions neuronales pouvaient voir le jour. Bien qu'il soit principalement issu de l'intuition d'un chercheur et élaboré il y a plus d'un demi-siècle, le modèle de Hebb (1949) (précisé par la découverte du processus de potentialisation à long terme, Bliss et Lomo, 1973) est toujours d'actualité. L'idée centrale de ce modèle est que les neurones qui s'activent ensemble se connectent ensemble (*Neurons that wire together fire together*). L'explication plus complète est que lorsqu'un neurone A se situe suffisamment près pour exciter un neurone B et que,

de façon répétée et persistante, le neurone A prend part à l'activation du neurone B, des mécanismes de croissance induits par des modifications moléculaires se mettent en place de telle sorte que l'activité du neurone A facilite inmanquablement l'activité du neurone B (Hebb, 1949). Dans un contexte donné, au contact d'un contenu d'apprentissage particulier : « [...] des connexions neuronales sont créées ou renforcées, d'autres sont affaiblies ou éliminées, selon les besoins [...] » (OCDE, 2007, p. 13). Pour illustrer ces modifications des connexions entre les neurones, une analogie est souvent proposée (voir p. ex. Potvin, 2013) selon laquelle l'établissement de connexions serait semblable à la création de sentiers au cœur d'une forêt : au début d'un apprentissage, la création de nouvelles connexions est exigeante, tout comme l'instauration du tracé d'un nouveau sentier dans une forêt sauvage. Puis, plus le sentier est emprunté, plus celui-ci devient praticable et plus il devient facile de se déplacer d'un point A à un point B (comme l'influx nerveux se propage plus efficacement au fur et à mesure que les connexions neuronales sont mobilisées). À l'inverse, si le sentier n'est plus utilisé, la végétation reprendra sa place et celui-ci disparaîtra. De la même façon, les connexions neuronales qui ne sont plus utiles seront éliminées.

Le concept de plasticité cérébrale permet donc d'établir un premier pont entre le cerveau et l'apprentissage. Ce que l'enseignant observe chez ses élèves sur le plan comportemental, qu'il s'agisse d'une amélioration de la performance à une tâche, de la vitesse d'exécution, de l'aisance à accomplir un exercice, etc. découle de modifications qui s'opèrent au niveau des connexions entre les neurones du cerveau. Le concept de plasticité cérébrale renvoie ainsi à l'idée que le cerveau est un organe flexible qui possède la capacité de se modifier tout au long de la vie pour s'adapter à son environnement et pour apprendre.

Or, il semblerait que malgré cette forte capacité du cerveau à se modifier pour apprendre, certaines contraintes pourraient limiter la plasticité cérébrale. Ces

contraintes seraient surtout attribuables à la façon dont le cerveau est construit avant même que n'ait lieu l'apprentissage, c'est-à-dire son architecture initiale, découlant notamment de l'évolution humaine et du développement. En raison de ces contraintes, le cerveau pourrait avoir davantage de facilité à modifier certaines connexions neuronales plutôt que d'autres afin de réaliser certains apprentissages. Cette question est approfondie dans la section qui suit en discutant précisément du concept de recyclage neuronal.

2.1.2 Concept de recyclage neuronal

Le concept de recyclage neuronal a été introduit en 2005 par Dehaene, chercheur en psychologie cognitive. Ce dernier définit le recyclage neuronal comme : « l'invasion partielle ou totale, par un objet culturel nouveau, de territoires corticaux initialement dévolus à une fonction différente » (2007, p. 200). En d'autres mots, le recyclage neuronal constituerait une reconversion des circuits neuronaux qui étaient autrefois associés à une fonction « qui avait déjà son utilité dans notre passé évolutif » (Dehaene, 2007, p. 200) à une nouvelle fonction qui présente une plus grande utilité dans le contexte culturel présent.

Le concept de recyclage neuronal rappelle celui d'exaptation formulé dans la théorie de l'évolution (Gould et Vrba, 1982) qui consiste en la « réutilisation, au cours de l'évolution, d'un ancien mécanisme biologique pour accomplir un rôle complètement différent » (Dehaene, 2007, p. 384, traduction libre). Par exemple, les plumes présentes chez certains dinosaures pour assurer à l'origine le maintien de leur température corporelle leur auraient permis, au cours de l'évolution, de développer la capacité à voler, par sélection de leurs caractéristiques mécaniques (Foth, Tischlinger et Rauhut, 2014). À la différence du concept d'exaptation, celui du recyclage neuronal implique toutefois une réutilisation ou une reconversion qui ne provient pas d'une modification

sur le plan génétique. Le recyclage prend place durant la vie d'un individu, grâce à la capacité du cerveau de se modifier (Dehaene, 2014). D'autres théories connexes à celles du recyclage neuronal ont été proposées dans la littérature scientifique, notamment la théorie des circuits partagés (*Shared circuits model*, Hurley, 2008) et l'hypothèse du redéploiement massif (*Massive redeployment hypothesis*, Anderson, 2010). Celle du recyclage neuronal est cependant la seule à faire référence de façon explicite aux modifications cérébrales en lien avec les apprentissages scolaires. C'est la raison pour laquelle cette théorie a été choisie comme cadre de référence central à ce projet.

Tel que discuté à la section précédente, l'idée que la structure du cerveau puisse être modifiée par l'apprentissage existe depuis de nombreuses années (OCDE, 2007; Pascual-Leone *et al.*, 2005), bien avant l'introduction du concept de recyclage neuronal. Le concept de recyclage neuronal s'apparente au concept de plasticité cérébrale puisqu'il implique une transformation sur le plan cérébral. Cependant, il s'en différencie également, car à cette idée de transformation s'ajoute l'idée de contraintes imposées par les propriétés initiales du cerveau (qui mène donc à l'idée d'une reconversion). En effet, selon la théorie du recyclage neuronal, les capacités d'adaptation des neurones ne seraient pas infinies et demeureraient liées aux contraintes biologiques (Dehaene, 2007). Le choix du mot « recyclage » dans le terme de recyclage neuronal met d'ailleurs l'accent sur le fait que « [...] le tissu neuronal qui permet l'apprentissage ne se comporte pas comme une ardoise vierge. Au contraire, il possède des propriétés intrinsèques qui le rendent plus ou moins approprié au nouvel usage que l'on souhaite en faire » (Dehaene, 2007, p. 200).

Le concept de recyclage neuronal s'oppose donc à une vision de l'apprentissage selon laquelle l'esprit humain serait, à la naissance, une page blanche (concept de *tabula rasa* introduit par Locke en 1690). Il s'arrime plus facilement à une vision constructiviste

de l'apprentissage (Piaget, 1975), car il suggère que l'architecture cérébrale initiale (c'est-à-dire ce qui était présent au départ dans le cerveau) influence la manière dont se fera l'apprentissage. Selon la théorie du recyclage neuronal, un apprentissage ne peut ainsi jamais renverser totalement les caractéristiques initiales du cerveau, mais il peut les détourner ou les transformer de façon minimale afin qu'elles remplissent un rôle plus utile dans un contexte culturel précis (Dehaene, 2008). Trois postulats centraux sont à l'origine de la théorie du recyclage neuronal. Ces derniers sont ci-après énoncés et discutés.

1. L'organisation du cerveau humain est soumise à de fortes contraintes anatomiques et connexionnelles héritées de l'évolution. Des cartes neurales organisées sont présentes et biaisent des apprentissages ultérieurs.
2. Les acquisitions culturelles (comme la lecture) doivent trouver leur niche neuronale, c'est-à-dire un ensemble de circuits qui sont suffisamment près de la fonction désirée et suffisamment plastique pour réorienter une fraction importante de leurs ressources neuronales à cette nouvelle utilisation.
3. Alors que les territoires réservés aux fonctions plus anciennes du point de vue de l'évolution sont envahis par de nouveaux objets culturels, leur organisation préalable n'est jamais entièrement effacée. Ainsi, les contraintes neuronales antérieures exercent une influence puissante sur l'acquisition culturelle et l'organisation du cerveau adulte. (Dehaene et Cohen 2007, p. 384-385, traduction libre)

Ces trois postulats apportent des informations importantes concernant la théorie du recyclage neuronal. Le premier postulat met en lumière l'idée selon laquelle la structure et le fonctionnement dont le cerveau a hérité de l'évolution peuvent « biaiser », c'est-à-dire poser des contraintes, à la façon dont se réalisent certains apprentissages. Tel que discuté précédemment, l'architecture préalable du cerveau poserait un cadre au sein duquel de nouveaux apprentissages pourraient prendre place. Le deuxième postulat précise que ce sont les apprentissages associés à des inventions culturelles relativement récentes, comme la lecture et le calcul, qui nécessitent de mettre en place

un processus de recyclage neuronal. En effet, pour que ces apprentissages puissent prendre place sur le plan cérébral, ils doivent s'intégrer à un ensemble de réseaux de neurones (« circuits ») déjà en place et pour lesquels une partie des neurones peuvent être recyclés au nouvel usage que l'on souhaite en faire, grâce à la plasticité. Le deuxième postulat laisse également entendre que, dépendamment du nouvel apprentissage souhaité, certains réseaux de neurones sont plus appropriés ou optimaux pour réaliser le recyclage neuronal, notamment parce qu'ils occupent déjà une fonction assez près de la nouvelle fonction à acquérir. Il y aurait donc des régions cérébrales prédisposées, des « niches neuronales » (Dehaene, 2005; Dehaene et Cohen, 2007; Menary, 2014), qui seraient plus enclines à prendre en charge certains apprentissages. Une analogie intéressante, bien qu'imparfaite, pour illustrer cette idée pourrait être la suivante : le cerveau serait comparable à une usine au sein de laquelle différents travailleurs accomplissent des tâches spécialisées et compartimentées visant ultimement à livrer de la marchandise. Si un nouveau type de boîte est introduit afin d'emballer la marchandise, il sera beaucoup plus facile de demander au travailleur qui emballait déjà la marchandise avec les anciennes boîtes de développer les compétences d'emballage propres au nouveau type de boîtes, étant donné que ce dernier est déjà familier avec les techniques générales et les considérations propres à l'emballage, en comparaison avec le travailleur qui s'occupe par exemple de la réception des produits ou de la gestion informatique de la livraison. Dans cette analogie, le nouveau type de boîte illustre la nouvelle acquisition culturelle que l'on souhaite intégrer, et le travailleur responsable de l'emballage de la marchandise représente le terrain le mieux disposé à accueillir le nouvel apprentissage (la « niche neuronale »). Finalement, le troisième postulat met l'accent sur le fait que l'organisation préalable des réseaux de neurones qui accueillent le nouvel apprentissage n'est pas effacée à la suite du recyclage neuronal. Pour reprendre l'analogie de l'usine, le travailleur qui développe une compétence d'emballage liée aux nouvelles boîtes demeure capable d'emballer à l'aide des anciennes boîtes. Il se peut même que ce travailleur ait le réflexe de recourir spontanément à ses premières techniques d'emballage, même avec les nouvelles boîtes,

puisque ces techniques sont celles qu'il utilise depuis longtemps et qu'il les a fortement automatisées.

Ces trois postulats sous-jacents à la théorie du recyclage neuronal ont mené Dehaene et Cohen (2007) à formuler quatre prédictions, qui devraient être observables pour les apprentissages culturels nécessitant du recyclage neuronal. Ces prédictions sont les suivantes :

1. La variabilité dans la représentation cérébrale d'une invention culturelle devrait être limitée.
2. La variabilité culturelle devrait également être limitée. Des invariants interculturels solides devraient être identifiés, par exemple à travers les systèmes d'écriture du monde.
3. La rapidité et la facilité avec laquelle une invention culturelle est intégrée devraient pouvoir être prédites en fonction du niveau de complexité du recyclage requis. Cette complexité serait en lien avec deux composantes : 1- la distance entre la fonction initiale de la région cérébrale et la nouvelle fonction à acquérir et 2- la complexité intrinsèque associée à l'invention culturelle à acquérir. Les propriétés corticales des neurones devraient ultimement expliquer à la fois la facilité qu'ont les enfants à acquérir de nouveaux outils culturels, mais également les difficultés spécifiques qu'ils rencontrent à l'occasion.
4. Bien que l'acculturation conduise souvent à d'énormes gains cognitifs - par exemple, l'alphabétisation améliore la mémoire verbale et la conscience phonémique [...] - il devrait être possible d'identifier de petites pertes de capacités perceptives et cognitives en raison de la concurrence entre la nouvelle capacité culturelle et la fonction plus ancienne du point de vue de l'évolution dans les régions corticales concernées. (Dehaene et Cohen, 2007, p. 385, traduction libre)

En lien avec le deuxième postulat suggérant que certaines régions cérébrales seraient mieux disposées à accueillir certains apprentissages et qu'il existerait ainsi des niches neuronales propres à différents apprentissages, la première prédiction est donc que l'on

devrait observer une grande stabilité au niveau de la localisation cérébrale des réseaux de neurones propres à chaque apprentissage associé à une invention culturelle. Chacun de ces apprentissages devrait solliciter les mêmes réseaux de neurones chez tous les individus. Considérant que le cerveau de l'humain, comme celui des primates, a hérité de son évolution une architecture cérébrale organisée et fortement reproductible d'une personne à l'autre (Dehaene, 2014), celle-ci contraint et canalise les apprentissages culturels vers certaines régions précises du cerveau et la représentation cérébrale de ces apprentissages culturels devrait présenter peu de variabilité d'un individu à l'autre. De plus, comme cette architecture cérébrale préexistante découle de l'évolution humaine, les réseaux de neurones se recyclant pour prendre en charge un apprentissage culturel ne devraient pas non plus différer selon la culture, même si un apprentissage est associé à des spécificités propres à la culture au sein de laquelle il s'inscrit (p. ex., la variété des systèmes d'écriture propres à la lecture et aux mathématiques à travers le monde). D'ailleurs, considérant les particularités des réseaux de neurones prenant en charge le nouvel apprentissage, des invariants interculturels devraient pouvoir être identifiés. Pour reprendre l'exemple de la lecture, si une région spécifique semble mieux disposée à prendre en charge la reconnaissance des symboles écrits, alors certains invariants devraient pouvoir être constatés parmi les systèmes d'écriture utilisés à travers le monde.

La théorie du recyclage neuronal met ainsi en évidence des éléments qui semblent particulièrement intéressants pour le domaine de l'éducation. D'abord, il apparaît que le développement de certaines habiletés cognitives ne soit possible que par l'éducation. En effet, plusieurs capacités cognitives découlent d'activités culturelles qui ont été créées de toutes pièces par l'humain et qui sont apparues trop récemment pour que l'évolution seule ait pu générer des réseaux neuronaux qui leur sont propres. L'un des postulats sur lesquels s'appuie le recyclage neuronal est donc que certaines capacités cognitives ne peuvent se développer que par l'éducation. L'apprentissage de la lecture

et du calcul en sont d'excellents exemples. Dans le cas de la lecture, celle-ci s'appuie sur l'invention culturelle des systèmes d'écriture datant d'environ 5400 ans (les systèmes d'écriture alphabétique n'étant apparus qu'il y a 3800 ans) (Wolf, 2008). Il apparaît donc logiquement impossible que la lecture soit un produit de l'évolution et que le cerveau ait eu le temps de se modifier pour développer des circuits neuronaux propres à cette capacité cognitive (Ahr, Houdé et Borst, 2016; Brem *et al.*, 2010; Wolf, 2008). Selon la théorie du recyclage neuronal, le langage écrit trouverait plutôt sa place dans le cerveau de l'élève en s'ancrant au sein de circuits déjà fonctionnels, mais « dont la fonction demande à être minimalement reconvertie » (Dehaene, 2007, p. 61). Goswami (2008) affirme en ce sens (p. 383, traduction libre) :

Bien que le cerveau n'ait pas évolué pour lire, il est capable de développer des connexions pour supporter la lecture lui permettant d'encoder l'expérience de l'écrit dans le système nerveux. Cela est possible grâce au recrutement de structures neuronales qui accomplissent déjà des fonctions très similaires.

Dans cette optique, apprendre à lire et réaliser d'autres apprentissages culturels ne serait possible que parce que le cerveau de l'enfant contiendrait dès le départ des réseaux de neurones ayant la capacité d'être modifiés et de se spécialiser progressivement durant l'apprentissage. Cette idée de spécialisation fonctionnelle d'une région cérébrale précise est centrale au concept de recyclage neuronal. Les inventions culturelles qu'un élève doit s'approprier ne sont possibles que « dans la mesure où elles trouvent leur inscription au sein d'une architecture cérébrale préexistante » (Dehaene, 2014, p. 95).

Un autre élément découlant de la théorie du recyclage neuronal et présentant un intérêt pour le monde de l'éducation est l'idée selon laquelle certaines approches d'apprentissage ou d'enseignement seraient potentiellement plus compatibles que d'autres avec l'architecture initiale du cerveau. En effet, comme la théorie du recyclage

neuronal implique que l'apprentissage est contraint par les caractéristiques initiales du cerveau, il ne serait pas possible de tout apprendre de n'importe quelle façon. L'architecture du cerveau définirait ainsi un jeu de possibilités, ou de « pré-représentations » (Changeux, 1983) à partir desquelles pourrait se réaliser un nouvel apprentissage. Sur le plan éducatif, le concept de recyclage neuronal laisse donc entendre que l'apprentissage et l'enseignement ne peuvent pas faire fi de la structure initiale du cerveau et qu'il serait essentiel d'en tenir compte dans la planification de l'enseignement (Dehaene, 2008). Dans cette optique, certains types d'enseignement seraient possiblement plus compatibles que d'autres avec l'architecture initiale du cerveau. Dehaene (2007) affirme d'ailleurs : « [...] son efficacité doit dépendre du degré de reconversion neuronale nécessaire ainsi que de l'adéquation de la méthode d'enseignement avec la structure préexistante de nos réseaux cérébraux » (p. 233). Le concept de recyclage neuronal remet donc en question l'idée selon laquelle l'approche pédagogique utilisée devrait toujours être adaptée et différenciée en fonction du « style d'apprentissage » ou des caractéristiques de chaque élève : le cerveau aurait hérité de son évolution des contraintes physiologiques qui feraient en sorte que certaines approches seraient potentiellement plus efficaces que d'autres pour favoriser l'apprentissage. Bien qu'il soit essentiel de tenir compte de la personnalité et de la complexité de chaque apprenant et qu'il demeure nécessaire de différencier l'enseignement en fonction notamment de leurs forces ou de leurs faiblesses respectives, il apparaît également primordial de réfléchir et planifier l'enseignement afin qu'il soit adapté le mieux possible au fonctionnement et à l'architecture du cerveau des élèves, qui présentent, somme toute, des similarités non négligeables.

Pour mieux comprendre le rôle du recyclage neuronal dans l'apprentissage et l'enseignement, il importe d'aborder plus en détail le rôle du recyclage neuronal et les mécanismes cérébraux qui y sont associés pour différents apprentissages. La prochaine section propose donc un état des connaissances sur le recyclage neuronal afin de mieux

comprendre le rôle de ce mécanisme au regard des apprentissages fondamentaux que sont la lecture et l'arithmétique, puisqu'il s'agit des apprentissages pour lesquels les mécanismes cérébraux ont été les plus explorés. Une analyse du rôle probable que pourrait jouer le recyclage neuronal est également réalisée au regard d'autres apprentissages qui sont pour le moment moins explorés par la recherche. La section qui suit a donc comme objectif de discuter de la façon dont le cerveau s'adapte et se « recycle » pour permettre l'acquisition de différents apprentissages scolaires.

2.1.3 Mécanismes cérébraux associés au recyclage neuronal pour différents apprentissages scolaires

2.1.3.1 Apprentissage de la lecture

La première observation ayant permis d'établir un lien entre le fonctionnement cérébral et la lecture a été faite par le neurologue Déjerine au début du 19^e siècle et a plus tard été publiée dans un mémoire en 1892. À cette époque, ce chercheur a constaté que l'un de ses patients n'était plus du tout capable de lire des lettres ou des mots, alors qu'il détenait pourtant une bonne acuité visuelle et qu'il parvenait aisément à reconnaître d'autres objets, incluant les visages. Ce patient arrivait aussi à reconnaître facilement les chiffres, qui ont pourtant une forme semblable aux lettres sur le plan visuel, à les lire et même à réaliser des calculs complexes. Il ne semblait donc « aveugle » qu'aux lettres et aux mots. À la mort du patient, Déjerine a pratiqué une autopsie sur ce dernier et a constaté qu'une région précise de son cerveau, située dans la partie postérieure de l'hémisphère gauche, était lésée. Il a alors émis l'hypothèse que cette région du cerveau était responsable de la capacité à reconnaître les symboles de la langue écrite.

Un peu plus récemment, d'autres chercheurs (Cohen *et al.*, 2003) ont utilisé l'imagerie cérébrale pour comparer l'anatomie du cerveau de patients devenus alexiques (c'est-à-dire incapables de lire, mais pourtant capables de reconnaître des objets, de

comprendre le langage et de parler) à la suite d'un accident vasculaire cérébral, avec l'anatomie cérébrale de patients sans alexie. Ces chercheurs ont également découvert que les patients qui ne parvenaient pas à lire présentaient tous une lésion dans la même région que celle identifiée quelque cent ans plus tôt par Déjerine. Ils ont identifié cette région comme étant la région occipito-temporale gauche, une petite région située à la base de l'hémisphère gauche du cerveau (voir Figure 2.1).

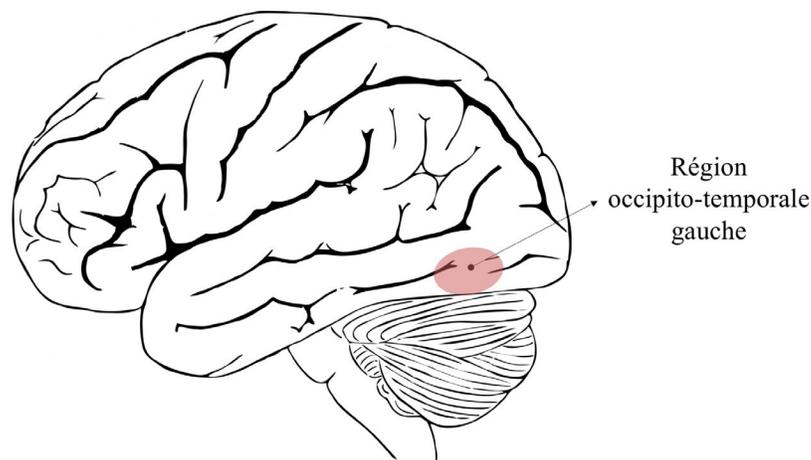


Figure 2.1 Identification de la région occipito-temporale gauche. La figure présente une vue de l'hémisphère gauche du cerveau. Il est à noter que la région se poursuit sur la partie ventrale du cerveau.

Vers la même période, d'autres recherches ont également permis de déterminer que cette région était liée à la capacité de reconnaître spécifiquement les symboles du langage écrit. À titre d'exemple, des chercheurs ont constaté que cette région était mobilisée de façon beaucoup plus importante lorsqu'on présentait à un sujet des mots écrits, comparativement à des mots prononcés oralement (Dehaene, Le Clec'H, Poline, Le Bihan et Cohen, 2002). Elle s'activait également davantage lorsqu'on présentait des mots écrits en comparaison à d'autres stimuli visuels tels que des visages ou différents

objets (Szwed *et al.*, 2011; Tarkiainen, Cornelissen et Salmelin, 2002). Ces recherches ont donc mené à la conclusion que la région occipito-temporale gauche était vraisemblablement liée à la reconnaissance visuelle des mots écrits puisque ceux-ci activent systématiquement et sélectivement cette petite région, toujours située au même point, à quelques millimètres près (Dehaene, 2014). D'autres recherches ont même permis de montrer une spécificité élevée de cette région pour les mots écrits en comparant l'activité cérébrale lors de la lecture de mots et de pseudomots (Lochy, Jacques, Maillard, Colnat-Coulbois, Rossion, Jacques et Jonas, 2018; Schuster, Hawelka, Richlan, Ludersdorfer et Hutzler, 2015; Taylor, Rastle et Davis, 2013; Wandell, 2011). Cette région du cerveau est d'ailleurs couramment désignée par l'appellation « région de la forme visuelle des mots » ou en anglais *visual word form area* (Cohen *et al.*, 2000; 2002; Dehaene *et al.*, 2002; Gaillard *et al.*, 2006). Des chercheurs ont également découvert que cette région n'était pas mobilisée chez les non lecteurs complets lorsque des mots écrits leur sont présentés (Dehaene *et al.*, 2010) ce qui laisse entendre que la spécialisation de cette région pour la reconnaissance visuelle des symboles écrits ne se développerait qu'avec l'apprentissage de la lecture.

Or, la variété des systèmes d'écriture dans le monde est considérable et laisse croire que les régions mobilisées par le cerveau pour décrypter les symboles écrits pourraient différer selon le système d'écriture. Certaines écritures représentent en effet des mots entiers ou des éléments de sens (caractères chinois), alors que d'autres représentent des syllabes (syllabaire japonais *kana*), et certaines les sons élémentaires du langage, les phonèmes, en les enchaînant de gauche à droite (notre alphabet), de droite à gauche (alphabets hébreu et arabe), voire de haut en bas (écriture mongole traditionnelle) (Dehaene, 2014). Il serait donc logique de croire que les réseaux de neurones mobilisés durant la lecture soient à leur tour très différents d'une culture à l'autre (Dehaene, 2014). Or, plusieurs recherches indiquent que ce n'est pas le cas. En effet, la variabilité du réseau cérébral lié à la lecture est très faible d'une personne à l'autre. À quelques

millimètres près, la région de la forme visuelle des mots est systématiquement mobilisée lors de la lecture (Cohen *et al.*, 2000; Dehaene *et al.*, 2002), et ce, même chez les lecteurs d'écritures visuellement très différentes comme le chinois ou le japonais (Bolger, Perfetti et Schneider, 2005; Nakamura, Dehaene, Jobert, Le Bihan et Kouider, 2005). Les seules différences sur le plan cérébral se remarquent dans l'intensité et la surface de l'activation qui diffèrent légèrement selon les caractéristiques de chaque écriture (Bolger *et al.*, 2005). Tout bon lecteur, peu importe sa langue, utilise donc les mêmes circuits neuronaux associés à la région de la forme visuelle des mots.

Il semblerait aussi qu'en plus d'être spécifiquement responsable de la reconnaissance visuelle des mots chez tous les lecteurs, cette région soit également associée au fait d'être un bon lecteur. Une recherche utilisant la technologie de l'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle (IRMf) menée auprès de plusieurs centaines de participants âgés de 7 à 18 ans (Shaywitz *et al.*, 2002) a en effet permis de constater qu'au fur et à mesure que la performance à une tâche de lecture s'améliore, l'activation de la région de la forme visuelle des mots augmente et cette augmentation de l'activation est davantage corrélée au niveau de performance du participant qu'à son âge. D'autres recherches appuient également ce résultat (Maurer, Brandeis et McCandliss, 2005; Maurer, Blau, Yoncheva et McCandliss, 2010; Schlaggar et McCandliss, 2007). Des études menées auprès d'enfants et de jeunes adultes ont également démontré que l'activation de la région de la forme visuelle des mots est corrélée avec le niveau de performance à différents tests de lecture (Beaulieu *et al.*, 2005; Turkeltaub *et al.*, 2003). À l'inverse, les résultats de deux méta-analyses (Martin, Kronbichler et Richlan, 2016; Richlan, Kronbichler et Wimmer, 2011) et de plusieurs autres études (Centanni *et al.*, 2019; Feng *et al.*, 2019; Helenius, Tarkiainen, Cornelissen, Hansen et Salmelin, 1999; Maurer *et al.*, 2007) montrent que les enfants et adultes dyslexiques présentent très souvent une sous-activation de la région de la

forme visuelle des mots. En résumé, ces recherches convergent vers l'idée que plus le lecteur parvient à mobiliser cette région de son cerveau, plus la lecture apparaît efficace. En plus de l'augmentation de l'activité cérébrale associée à cette région du cerveau, une diminution de l'activité cérébrale dans certaines régions de l'hémisphère droit du cerveau serait aussi observée au fur et à mesure de l'amélioration en lecture (Centanni *et al.*, 2019; Schlaggar et McCandliss, 2007; Yoncheva *et al.*, 2010). L'expertise en lecture serait donc caractérisée à la fois par une utilisation accrue et plus efficace d'une région qui semble optimale pour la lecture, la région occipito-temporale gauche, et par une diminution de l'utilisation de régions cérébrales qui semblent moins appropriées. Progressivement, au contact du langage écrit, l'activité cérébrale observée évolue ainsi d'une activité bilatérale (gauche et droite) et étendue, vers une activité cérébrale focalisée dans une région spécifique de l'hémisphère gauche du cerveau (Schlaggar *et al.*, 2002; Shaywitz *et al.*, 2002).

Une région précise du cerveau semble donc être particulièrement disposée pour prendre en charge l'apprentissage de la lecture. Afin de mieux comprendre comment la lecture trouve sa place dans le cerveau, plusieurs chercheurs suggèrent de considérer l'architecture cérébrale de l'enfant avant même qu'il n'apprenne formellement à lire (Dehaene et Cohen, 2007; Dehaene, 2008; Van Atteveldt et Ansari, 2014). Le cerveau d'un enfant d'environ 5-6 ans est déjà hautement spécialisé pour la vision et le langage, qui sont des préalables essentiels à la lecture (pour reconnaître les mots et leur attribuer un sens). En effet, le cerveau possède notamment des régions cérébrales capables de reconnaître les objets : le cortex occipito-temporal gauche et le cortex occipito-temporal droit situés dans la partie postérieure du cerveau. Il possède également des régions responsables de la compréhension orale, de la production de la parole, de la phonologie et du sens des mots situées principalement dans le lobe temporal gauche chez la plupart des élèves (Segalowitz, 2014; Ward, 2010). L'apprentissage de la lecture prend appui sur cette architecture cérébrale préexistante et sur ces régions

cérébrales accomplissant des fonctions qui apparaissent fondamentales pour lire (Deheane et Cohen, 2007; McCandliss, Cohen et Dehaene, 2003). Ces informations cérébrales peuvent être mises en relation avec la littérature en psychologie cognitive qui identifie classiquement deux composantes principales à la lecture : l'identification des mots écrits et la compréhension langagière (Gough & Tunmer, 1986). La première composante inclut les processus permettant d'identifier les mots, dont le principal qui consiste à attribuer un son (phonème) au symbole écrit (graphème). Ces processus d'identification des mots écrits seraient spécifiques à l'acte de lire (Sprenger-Charolles & Casalis, 1996). La seconde composante consisterait à donner un sens à l'écrit, c'est-à-dire à comprendre ce qui est lu. Cette composante inclut le traitement des aspects syntaxiques et sémantiques et elle est qualifiée de non-spécifique, car elle intervient également dans la compréhension du langage oral. Ces composantes contribuent toutes deux à la réussite en lecture, mais il semble que les processus spécifiques jouent un rôle de premier plan, particulièrement en début d'apprentissage, et que leur maîtrise constitue une condition sine qua non à la compréhension de ce qui est lu (Kirby, 2006).

À la lumière des processus cognitifs proposés dans la littérature ainsi que de l'architecture initiale du cerveau, le cortex occipito-temporal gauche apparaît particulièrement bien disposé pour accueillir l'apprentissage culturel qu'est la lecture. La fonction initiale de cette région concerne l'identification visuelle des objets en général (outils, maisons, visages, etc.) (Dehaene *et al.*, 2002; McCandliss *et al.*, 2003). Cette fonction de départ est donc déjà très similaire à la fonction à acquérir : la reconnaissance visuelle de la forme des lettres et des mots. De plus, cette région du cerveau est à la fois reliée au cortex visuel qui lui permet de réaliser le décodage visuel des lettres et des mots ainsi qu'aux différentes aires du langage, situées dans l'hémisphère gauche, avec lesquelles les projections sont plus nombreuses, plus directes et plus rapides puisque situées dans le même hémisphère cérébral. Cette région du cerveau entretient donc des connexions privilégiées avec des régions centrales du langage, telle que la région de Wernicke qui joue un rôle important dans la

compréhension du langage écrit et parlé (Stevens, Kravitz, Peng, Tessier et Martin, 2017). Ce sont ces aires du langage qui permettent ainsi d'attribuer une prononciation et un sens à ce qui est décodé visuellement (Goswami, 2008). Le cortex occipito-temporal gauche est d'ailleurs situé physiquement très près du cortex temporo-pariétal, une région associée au traitement des sons du langage et à la conversion phonologique, c'est-à-dire à la conversion des symboles écrits en sons (Temple *et al.*, 2003). Celle-ci constitue donc une porte d'entrée privilégiée permettant d'accéder aux réseaux de neurones liés au langage qui sont notamment associés au sens des mots. La nécessité de développer une telle interaction entre la reconnaissance visuelle du langage écrit et la sémantique propre à ce langage met ainsi en lumière pourquoi le cortex occipito-temporal gauche semble davantage propice que celui de l'hémisphère droit à assurer la fonction de reconnaissance des lettres et des mots. Il semble également que le cortex occipito-temporal gauche recevrait des informations visuelles de plus haute résolution de la part du cortex visuel primaire qui proviendraient du centre de la rétine, la fovéa. Cela lui permettrait de discriminer avec davantage de justesse des formes très petites et très semblables, ce qui apparaît indispensable pour identifier les lettres (McCandliss *et al.*, 2003). Les principales régions associées au réseau cérébral de la lecture sont identifiées à la figure 2.2.

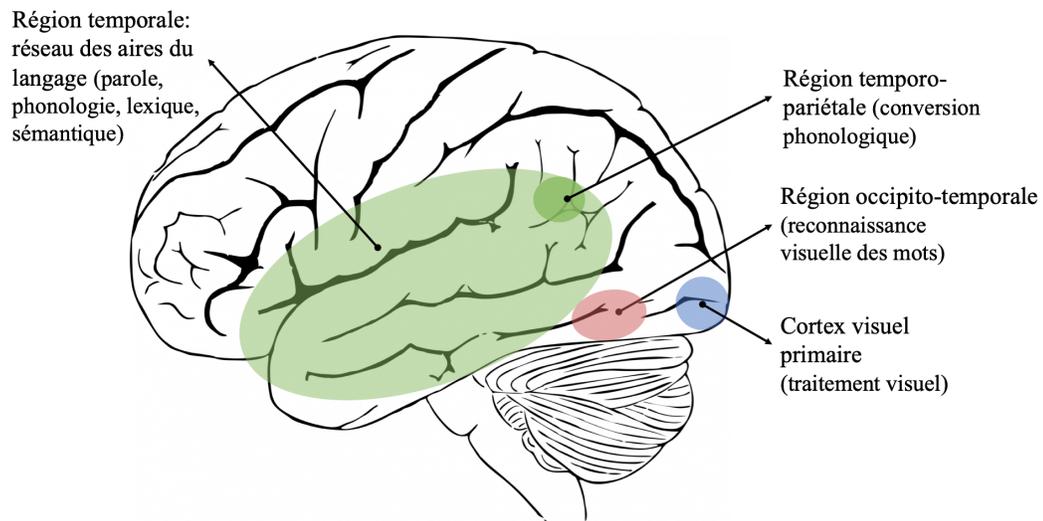


Figure 2.2 Identification des principales régions cérébrales faisant partie du réseau de la lecture. La figure présente une vue de l'hémisphère gauche du cerveau. Les fonctions de chacune des régions sont identifiées entre parenthèses.

Ces connexions et cette architecture préexistantes fournissent un cadre d'analyse permettant de mieux comprendre pourquoi le cerveau se réorganise de façon à dédier précisément cette région à la lecture (Hannagan, Amedi, Cohen, Dehaene-Lambertz et Dehaene, 2015) : elle semble effectivement constituer la région la mieux prédisposée, la niche neuronale (Dehaene et Cohen, 2007), pour accueillir cet apprentissage. Cela expliquerait également pourquoi il s'agit de la même région cérébrale chez tous les individus, et ce, peu importe leur culture. Au cours de l'apprentissage de la lecture, cette région se spécialiserait de manière progressive pour reconnaître les mots écrits et elle se connecterait graduellement avec d'autres régions cérébrales, notamment celles liées à la compréhension du langage oral situées dans le lobe temporel gauche (via le cortex temporo-pariétal), pour permettre au lecteur de donner un sens à ce qu'il décode sur le plan visuel (Dehaene, 2007, 2011). Chez le lecteur expert, un réseau cérébral spécifique permet ainsi d'intégrer et de combiner l'information orthographique et phonologique qui se développe durant l'apprentissage de la lecture, lui permettant

ultimement de comprendre ce qui est lu. (Hashimoto et Sakai, 2004; Marinkovic *et al.*, 2003; Monzalvo, Fluss, Billard, Dehaene et Dehaene-Lambertz, 2012; Price et Devlin, 2011). Il est à noter que d'autres études ont également permis de mettre en lumière le rôle de régions préfrontales supportant des fonctions cognitives plus générales, telle que la mémoire de travail, dans l'apprentissage de la lecture (Wang *et al.*, 2020). Cependant, comme ces mécanismes ne sont pas spécifiques à l'apprentissage de la lecture et ne concernent pas directement le processus de recyclage neuronal, ils ne seront pas développés davantage dans le cadre de cette thèse.

La première prédiction découlant de la théorie du recyclage neuronal (Dehaene et Cohen, 2007) était que la variabilité dans la représentation cérébrale d'une invention culturelle, dans ce cas-ci la lecture, devrait être limitée entre les individus et entre les cultures. L'état des connaissances scientifiques présenté ci-haut indique que cette prédiction s'est avérée correcte : le même « chemin de la lecture » (Dehaene, 2007) se met effectivement en place durant l'apprentissage chez tous les individus, et ce, peu importe le système d'écriture utilisé, en recyclant la région occipito-temporale gauche qui présente un haut niveau de sensibilité pour les mots écrits (Centanni *et al.*, 2017).

La deuxième prédiction laissait entendre qu'en raison des propriétés des neurones prenant en charge l'apprentissage de la lecture, des invariants culturels devraient pouvoir être observables. Or, les neurones du cortex occipito-temporal gauche répondent facilement à des combinaisons simples de lignes (p. ex., T, L, X, V, etc.) possiblement parce que ce type de combinaisons était particulièrement utile pour discriminer des objets. Cela pourrait expliquer pourquoi certaines formes élémentaires de caractères ou de lettres sont statistiquement plus fréquentes au travers des écritures du monde (Dehaene, 2007). L'élaboration des systèmes d'écriture aurait été influencée et contrainte par la sélection de formes élémentaires particulièrement faciles à discriminer par le cerveau.

La troisième prédiction découlant de la théorie du recyclage neuronal était que le niveau de difficulté d'un apprentissage devrait dépendre de la complexité du recyclage qui y est associé et que les propriétés initiales des neurones de la région recyclée pouvaient parfois engendrer des difficultés spécifiques durant l'apprentissage. Un exemple intéressant propre à la lecture qui appuie cette prédiction concerne la difficulté presque systématique qu'ont les enfants à discriminer les lettres miroir telles que *p* et *q* ou *b* et *d*. Cela pourrait être expliqué par le fait qu'en recyclant certains réseaux de neurones de la région occipito-temporale gauche, les propriétés initiales de ces neurones sont également recyclées (Dehaene *et al.*, 2010). Or, l'une de ces propriétés est la généralisation miroir, c'est-à-dire le fait d'identifier un objet comme étant le même peu importe son orientation. La généralisation miroir est probablement un vestige de l'évolution. En effet, dans la nature, la grande majorité des objets ne changent pas d'identité selon leur profil droit ou gauche (Rollenhagen et Olson, 2000). Cependant, cette propriété devient nuisible quand il s'agit d'apprendre à lire parce l'alphabet comprend des lettres qui sont des images en miroir l'une de l'autre, mais qui représentent pourtant des entités différentes auxquelles correspondent des phonèmes distincts. Des recherches ont montré que cette généralisation en miroir pour les lettres disparaît progressivement au cours de l'apprentissage de la lecture (Dehaene *et al.*, 2010; Kolinsky *et al.*, 2011; Pegado, Nakamura, Cohen et Dehaene, 2011; Pegado, Nakamura et Hannagan, 2014), mais demeure présente chez les personnes analphabètes qui ont beaucoup de difficulté à ne pas voir les lettre *b* et *d* comme étant deux objets identiques (Kolinsky et Fernandes 2014; Pegado *et al.*, 2014). Le mécanisme cérébral de l'inhibition cognitive dont il a été question plus tôt dans la problématique aurait possiblement un rôle à jouer afin de surmonter cette généralisation miroir en contexte de lecture (Ahr, Borst et Houdé, 2016; Ahr *et al.*, 2016; Ahr, Houdé et Borst, 2017; Brault Foisy, Ahr, Masson, Houdé et Borst, 2017). La capacité à discriminer les lettres miroir constitue donc un exemple permettant d'illustrer la troisième prédiction.

Finalement, la quatrième prédiction issue de la théorie du recyclage neuronal concernait le fait qu'à la suite du nouvel apprentissage, il devrait être possible d'observer, en marge des gains apportés par le nouvel apprentissage, de légères pertes sur le plan cérébral en lien avec la fonction initiale de la région recyclée, dû à la mise en place d'une certaine forme de compétition neuronale entre la fonction de départ et la nouvelle fonction. Dans le cas de la lecture, la fonction initiale de la région occipito-temporale gauche concernait la reconnaissance des objets (maisons, outils, visages, etc.). Or, une recherche menée auprès de personnes analphabètes (Dehaene *et al.*, 2010) a permis d'identifier que chez ces individus, la région occipito-temporale gauche montrait une activité très importante pour les visages. À l'inverse, lorsque des visages étaient présentés à d'ex-analphabètes (des individus ayant appris à lire à l'âge adulte) dont le niveau de compétence en lecture était variable, l'activité cérébrale observée dans la région occipito-temporale gauche durant la présentation de visages était corrélée négativement à leur performance en lecture : meilleurs ils étaient en lecture, moins cette région réagissait à la présentation de visages. Cette diminution de l'activité cérébrale n'était par ailleurs observable que dans la région située dans l'hémisphère gauche du cerveau. Inversement, l'activité cérébrale dans la même région de l'hémisphère droit augmentait avec la performance en lecture durant la présentation de visages. Selon les chercheurs, l'apprentissage de la lecture faisait donc en sorte de mettre en compétition la représentation visuelle des mots écrits avec celle des visages, possiblement parce que les formes élémentaires permettant de reconnaître les lettres, notamment les intersections de lignes, sont peu utiles, voire même incompatibles avec les formes permettant d'assurer la reconnaissance des visages (Dehaene, 2014). Le fait d'apprendre à lire a donc effectivement engendré de légères pertes liées à la fonction initiale de la région recyclée, celle-ci devenant moins mobilisée lors de la présentation de visages. Cependant, ces pertes observées dans la région occipito-temporale gauche se sont vues accompagnées d'une plus grande spécialisation de la région droite. Le même effet a également été observé auprès d'enfants âgés de neuf ans (Monzalvo *et al.*, 2012) : en comparant l'activité cérébrale d'élèves présentant un haut niveau de

performance en lecture à celle d'élèves présentant un bas niveau de performance, des chercheurs ont constaté que les premiers, comparativement aux seconds, présentaient une activité plus importante dans l'hémisphère gauche en réponse à la présentation de mots écrits, et plus importante dans l'hémisphère droit en réponse à la présentation de visages. Ces résultats laissent entendre que la mise en place du recyclage neuronal permettant l'apprentissage de la lecture induit une réorganisation sur le plan cérébral, ce qui converge avec la prédiction qui avait été formulée (Dehaene-Lambertz, Monzalvo et Dehaene, 2018).

L'acquisition de la lecture sur le plan cérébral a donc fait l'objet de nombreuses recherches dans les dernières années. Il semble d'ailleurs qu'il s'agisse de la discipline pour laquelle les mécanismes cérébraux sont les mieux connus (Schlaggar et McCandliss, 2007). Dans le contexte de la théorie du recyclage neuronal, il apparaît que l'apprentissage de la lecture n'est pas un apprentissage facile, parce qu'il nécessite une transformation relativement importante de l'architecture initiale du cerveau de l'élève. Les neurones de la région occipito-temporale gauche doivent notamment reconfigurer considérablement leurs connexions afin de se spécialiser pour accueillir la capacité à reconnaître les mots écrits (Dehaene, 2007). La capacité initiale du cortex occipito-temporal gauche à reconnaître d'autres objets (comme les visages) doit même, jusqu'à un certain point, être relocalisée dans les régions adjacentes du cerveau et dans l'hémisphère droit à la suite de ce recyclage neuronal (Dehaene *et al.*, 2010; Dehaene-Lambertz *et al.*, 2018). De plus, tel que mentionné précédemment, en plus d'impliquer le recyclage de la région occipito-temporale gauche, le cerveau de l'élève doit également établir des connexions entre cette région et celles liées au langage qui contiennent déjà le dictionnaire sémantique permettant de donner un sens aux mots qui sont lus (Marinkovic *et al.*, 2003). L'apprentissage de la lecture semble donc nécessiter un effort important en raison des contraintes associées à la structure préalable du cerveau. D'un point de vue éducatif, il apparaît important de se questionner sur la façon

dont l'enseignement peut contribuer à la mise en place de cet apprentissage, afin de favoriser la réussite des élèves. Toutefois, peu de recherches ont à ce jour tenté de comprendre l'impact de l'enseignement sur le développement de la compétence à lire en l'étudiant au niveau du cerveau. Or, sachant qu'une région cérébrale est associée à l'expertise en lecture, une question se pose d'emblée : comment l'enseignant peut-il, par les choix pédagogiques qu'il fait et les interventions qu'il met en place, avoir une incidence sur le fonctionnement cérébral de ses élèves et, plus précisément, sur la spécialisation de la région de la forme visuelle des mots qui s'opère durant le recyclage neuronal? Un enseignement qui tiendrait compte des contraintes associées à l'architecture initiale du cerveau pourrait-il faciliter cette spécialisation et donc contribuer à la mise en place du processus de recyclage neuronal? La section 2.2 abordera certaines recherches qui fournissent des premières pistes de réponse à cette question. Cependant, avant de discuter de la relation possible entre l'enseignement et le recyclage neuronal, il semble pertinent d'explorer davantage le rôle de ce mécanisme pour d'autres apprentissages scolaires, afin de mieux en évaluer la portée et l'importance. Dans cet objectif, la prochaine section vise à analyser la relation entre l'apprentissage de l'arithmétique et le recyclage neuronal.

2.1.3.2 Apprentissage de l'arithmétique

La capacité à comprendre ce que représentent les nombres symboliques permettant de réaliser des opérations arithmétiques élémentaires constitue également un apprentissage culturel qui s'appuierait sur un processus de recyclage neuronal (Dehaene, 2008, 2010). En effet, comme pour les systèmes alphabétiques, la représentation symbolique des quantités par les chiffres arabes (1, 2, 3, etc.) représente une invention culturelle relativement récente dans l'histoire de l'humanité (Dehaene, 2008). Le cerveau ne possède donc pas, de manière innée, une région cérébrale dont la fonction est de réaliser des opérations arithmétiques à l'aide de symboles

mathématiques. Comme pour la lecture, des recherches ont cependant permis de constater que l'apprentissage des nombres symboliques nécessaire à la réalisation de calculs mathématiques élémentaires repose sur une région bien précise située dans la partie supérieure postérieure du cerveau, dans le lobe pariétal : le sillon intrapariétal gauche et droit (voir une synthèse de plusieurs recherches à ce sujet dans Dehaene, Piazza, Pinel et Cohen, 2003). L'activation du sillon intrapariétal bilatéral (à gauche et à droite) a systématiquement été observée à la fois dans le cadre de tâches nécessitant de réaliser des calculs simples (p. ex., soustraction, addition, multiplication), mais également pour des tâches dont le but était de fournir une réponse approximative (p. ex., « le résultat de $32 + 16$ est-il plus près de 50 ou de 80? ») (Dehaene, Spelke, Pinel, Stanescu et Tsivkin, 1999; Dehaene, 2008). Même les raisonnements et calculs de très haut niveau, chez les mathématiciens professionnels, impliqueraient la mobilisation de ces réseaux de neurones (Amalric et Dehaene, 2016).

Il semble également que la variabilité dans la localisation de cette activité cérébrale ne dépasse jamais plus d'un centimètre (Dehaene, 2008). Tout comme la mobilisation de la région occipo-temporale gauche durant la lecture, l'activité du sillon intrapariétal pour des tâches en arithmétique a été observée dans le cadre d'un nombre important de recherches menées auprès d'adultes provenant de différents pays pour lesquels le langage, la culture et le système éducatif n'étaient pas les mêmes (p. ex., Chine, Japon, France et États-Unis) (Dehaene, 2008). La variabilité culturelle de cet apprentissage, sur le plan cérébral, est donc très faible.

Selon la perspective proposée par la théorie du recyclage neuronal, la mobilisation systématique de cette région spécifique du cerveau pourrait s'expliquer par l'architecture initiale que présente le cerveau, avant d'être mis en contact avec la notation symbolique (Dehaene, 1992; Gallistel et Gelman, 1992). En effet, il a été observé que le cerveau possède dès les premiers mois de la vie (Lipton et Spelke, 2003)

une architecture cérébrale lui permettant d'évaluer approximativement des quantités, généralement désigné par l'expression « sens du nombre », en référence à cette idée d'intuition numérique (Dehaene, 2010). Par exemple, l'être humain est en mesure dès son plus jeune âge de juger, avec un certain degré de précision, qu'un ensemble contient plus de jetons qu'un autre, c'est-à-dire qu'une quantité est supérieure ou inférieure à une autre (Fuhs et McNeil, 2013). Ce sens du nombre est déjà observable chez les nouveau-nés (Izard, Sann, Spelke et Streri, 2009; Lipton et Spelke, 2003). En effet, des chercheurs (Izard *et al.*, 2009) ont constaté que des bébés de 0 à 3 jours faisaient preuve d'un temps d'observation plus long lorsqu'on leur présentait visuellement un nombre de points dont la quantité correspondait au nombre de sons entendus quelques secondes auparavant, comparativement à lorsqu'on leur présentait visuellement un nombre de points dont la quantité différait du nombre de sons entendus. Le fait d'observer plus longuement les stimuli visuels lorsque ceux-ci équivalaient en quantité aux stimuli sonores constituerait, selon ces chercheurs, le premier signe d'une détection de la correspondance numérique et témoignerait d'une capacité numérique abstraite (Izard *et al.*, 2009). Une étude menée par Izard, Dehaene-Lambertz et Dehaene (2008) a également étudié l'activité cérébrale de nourrissons de 3 mois à qui l'on présentait des images d'objets dont la quantité était variable, à l'aide de l'électroencéphalographie. Pour ce faire, ces chercheurs ont utilisé un paradigme d'habituation (Berkson et Fitzgerald, 1963) qui consiste à présenter de manière répétée une information donnée, puis à observer ce qui arrive lorsque l'information présentée n'est plus la même. Dans le cadre de cette recherche, il s'agissait de présenter de façon répétée des stimuli (images) qui représentaient les mêmes objets et le même nombre d'objets (p. ex., quatre petits canards). Le fait de présenter la même information à répétition a pour effet, sur le plan neuronal, de diminuer progressivement l'activité des neurones jusqu'à atteindre un niveau minimal découlant de l'adaptation des neurones et de leur habituation à la présentation des mêmes stimuli. Il est alors possible de présenter un stimulus différent et d'observer la réaction du cerveau avec un plus haut niveau de précision pour ce nouveau stimulus. La recherche dont il est question impliquait ainsi de présenter à

l'occasion un stimulus dont le nombre ou le type d'objets présentés différait. Les résultats obtenus indiquent que le cerveau des nourrissons réagissait de façon distincte lorsque le stimulus présenté était différent : les nourrissons étaient sensibles aux changements concernant la nature de l'objet présenté ainsi que le nombre d'objets. Ces chercheurs sont également parvenus à distinguer les régions du cerveau qui répondaient au changement lié au type d'objet de celles qui répondaient au changement du nombre d'objets. Ils ont ainsi constaté qu'un changement associé à la quantité (c'est-à-dire au nombre d'objets présentés) était associé de façon distincte à l'activation d'un réseau de neurones situé principalement dans le sillon intrapariétal. Des expériences comportementales menées auprès de nourrissons âgés de 4 à 6 mois confirment également que ceux-ci possèdent un sens du nombre précoce et qu'ils parviennent à détecter par approximation des changements au niveau de la quantité d'objets contenus dans un ensemble (Feigenson, Dehaene et Spelke, 2004; Xu, 2003; Xu et Spelke, 2000). Des résultats convergents ont également été obtenus auprès d'enfants de 4 ans (Cantlon, Brannon, Carter et Pelphrey, 2006). Il semble donc que le sens du nombre soit observable très jeune et qu'il soit associé à la mobilisation d'une région très spécifique du cerveau (Ansari, 2008). Une recherche réalisée par d'autres chercheurs a également mené à des résultats similaires chez l'adulte (Pinel, Piazza, Le Bihan et Dehaene, 2004). En effet, à l'aide de l'IRMf, ces chercheurs ont observé l'activité cérébrale de douze participants adultes exposés à des ensembles de points présentés pendant environ 150 ms. Lors de cette tâche, les participants regardaient passivement les ensembles de points qui leur étaient présentés. Toujours selon un paradigme d'habituation, ces ensembles de points contenaient la plupart du temps 16 points, mais parfois, ils en contenaient un peu moins (8, 10 ou 13) ou un peu plus (20, 24 et 32). Les chercheurs ont constaté que lorsque le nombre de points changeait, l'activité cérébrale des participants changeait également, toujours dans la même région cérébrale : celle du sillon intrapariétal gauche et droit. D'autres études ont également permis de détecter l'activation des sillons intrapariétaux dans le cadre de tâches pour lesquelles des participants devaient déterminer lequel de deux chiffres arabes (p. ex., 5 ou 8)

représentait une plus grande quantité (p. ex., Pinel, Dehaene, Rivière et Le Bihan, 2001). Ces recherches ont aussi mis en évidence que l'activation du sillon intrapariétal était proportionnelle à la difficulté de la comparaison qui variait selon la distance séparant les deux nombres : plus les nombres présentés étaient près l'un de l'autre, plus la comparaison de la quantité s'avérait difficile et plus le sillon intrapariétal était mobilisé.

Qui plus est, les résultats d'une autre étude (Ansari et Dhital, 2006) indiquent que la région du sillon intrapariétal s'activerait davantage chez des adultes d'environ 20 ans que chez des enfants âgés en moyenne de 10 ans, lorsqu'on leur demande de comparer approximativement la quantité de points contenus dans deux ensembles, c'est-à-dire d'identifier quel ensemble contient le plus de points. Cela laisse entendre que bien que la présence d'un sens du nombre ait été observée chez des enfants âgés de seulement quelques jours, il semble que cette capacité continuerait à se développer et s'accentuerait avec l'âge.

Par ailleurs, d'autres éléments d'information laissent entendre que cette faculté à juger de la magnitude d'un ensemble d'objets, sans avoir recours aux nombres ou au comptage, pourrait même être innée. Elle a en effet été observée chez les plus proches cousins de l'homme, les chimpanzés (Hauser, Carey et Hauser, 2000; Woodruff et Premack, 1981), mais aussi chez des espèces beaucoup plus éloignées telles que les rats, les pigeons et même certaines espèces de poisson (Dehaene, 2011). Ces informations appuient donc l'hypothèse selon laquelle le développement de l'arithmétique serait possible par le biais d'un processus de recyclage neuronal s'appuyant sur un sens du nombre issu de l'évolution. Tout comme la vision et le langage, il est effectivement probable que le sens du nombre ait constitué un avantage considérable d'un point de vue évolutif, ce qui expliquerait pourquoi cette capacité pourrait être présente dès la naissance chez l'humain (Dehaene, 2008). Le fait de

posséder cette faculté d'approximation de la magnitude était possiblement utile aux ancêtres de l'homme parce qu'elle leur permettait d'accomplir différentes tâches essentielles à leur survie : elle aurait pu, par exemple, leur permettre de déterminer qu'un buisson contenait plus de baies qu'un autre, ou bien qu'une tribu ennemie était plus nombreuse et qu'il valait mieux se replier plutôt que de combattre.

Les résultats des recherches qui ont été présentées révèlent que tous les enfants possèdent des capacités protonumériques avant même leur entrée à l'école. En effet, avant d'apprendre formellement la numération, ils sont en mesure d'évaluer, de comparer et d'anticiper des quantités. Selon la théorie du recyclage neuronal, ce serait leur représentation interne de la quantité, leur sens du nombre, qui leur permettrait d'intégrer l'apprentissage culturel que constitue la notation symbolique et de réaliser des opérations arithmétiques. Il leur serait ainsi possible d'attribuer une signification aux chiffres arabes, de compter et, ultimement, de réaliser des calculs en tirant partie des réseaux de neurones préexistants, et, grâce à leur plasticité, à les recycler (Ansari, 2008; Piazza, Pinel, Le Bihan et Dehaene, 2007; Pinel et Dehaene, 2013). L'apprentissage formel de l'arithmétique se grefferait ainsi sur le sens du nombre déjà présent chez l'enfant, et solliciterait la même zone cérébrale du sillon intrapariétal gauche et droit qui se spécialiserait pour apprendre les symboles numériques (Ansari, 2016).

Ces recherches portant sur les mécanismes cérébraux associés à l'apprentissage de l'arithmétique permettent de discuter de plusieurs aspects relatifs aux prédictions issues de la théorie du recyclage neuronal (Dehaene et Cohen, 2007). D'abord, les recherches abordées précédemment mettent en évidence qu'il semble y avoir une variabilité très limitée dans la représentation cérébrale de l'invention culturelle, dans ce cas-ci le système numérique symbolique. L'état des connaissances à ce sujet révèle en effet que l'intégration des nombres symboliques sur le plan cérébral s'appuie toujours sur la

même région du sillon intrapariétal bilatéral. De plus, tout comme l'identification des lettres miroirs représentait une difficulté en lecture découlant des propriétés initiales des neurones qui étaient recyclées pour lire, l'apprentissage des nombres symboliques et de l'arithmétique peut aussi être associé à une difficulté découlant des propriétés initiales des neurones du sillon intrapariétal. Comme cette région du cerveau permet de juger de la magnitude d'un ensemble d'objets, notamment en fonction de l'espace que ceux-ci occupent, une erreur fréquente (qui avait d'ailleurs été relevée par Piaget dans sa tâche de conservation du nombre, voir Lipton et Spelke, 2003; Mehler et Bever, 1967) est de croire que la quantité dépend de l'espace occupé. Par exemple, de jeunes enfants auront tendance à dire qu'une rangée de jetons en contient davantage si ceux-ci sont plus espacés, comparativement à une rangée de jetons qui le sont moins. Généralement, cette évaluation de type « longueur = nombre » mène à un jugement correct de la quantité, mais ce n'est pas toujours le cas. Pour parvenir à évaluer avec certitude la quantité d'objets contenus dans un ensemble, il est nécessaire de compter ces objets (en utilisant le système symbolique). Dans certains contextes, les propriétés initiales des neurones du sillon intrapariétal qui permettent intuitivement à l'être humain d'évaluer la magnitude d'un ensemble d'objets peut donc poser une difficulté supplémentaire dans l'apprentissage du comptage (Houdé *et al.*, 2011).

Tout comme la lecture, l'apprentissage de l'arithmétique semble ainsi associé, sur le plan cérébral, à un processus de recyclage neuronal. Dans les deux cas, l'apprentissage nécessite d'attribuer une signification à des symboles écrits ayant été inventés de toutes pièces par l'homme (alphabet ou nombres arabes). Ces deux apprentissages scolaires sont ceux ayant été le plus discutés dans le cadre de la théorie du recyclage neuronal. Or, tel que précisé dans l'un des postulats sous-jacents à cette théorie, le processus de recyclage serait possiblement nécessaire pour tout apprentissage associé à une invention culturelle récente, comme c'est le cas pour la lecture et l'arithmétique. Il est donc possible que le recyclage neuronal soit impliqué dans d'autres apprentissages

scolaires qui constituent des acquisitions culturelles. La section suivante explore davantage cette hypothèse.

2.1.3.3 Autres apprentissages impliquant possiblement du recyclage neuronal

Les neurosciences apportent un nouvel éclairage quant à l'impact de la culture sur le cerveau humain. Plusieurs apprentissages scolaires relèvent en effet d'inventions culturelles récentes, ce qui laisse entendre qu'ils pourraient possiblement nécessiter de mettre en place des mécanismes de recyclage neuronal.

Par exemple, une recherche récente (Mason et Just, 2016) menée auprès d'étudiants en physique et en ingénierie s'est intéressée aux corrélats neuronaux de 30 concepts en physique (p. ex., le momentum, l'énergie, etc.), c'est-à-dire à la façon dont ces concepts sont représentés dans le cerveau. Les résultats de cette recherche indiquent qu'il existe des similarités entre les individus quant à la représentation de ces concepts de physique sur le plan cérébral : des concepts spécifiques semblent en effet associés à l'activation de régions précises du cerveau. De façon analogue à la lecture et à l'arithmétique, les activations cérébrales observées dans le cadre de cette étude étaient systématiques, c'est-à-dire localisées au même endroit, et ce, chez l'ensemble des participants. Cela laisse entendre que bien que le cerveau n'ait pas évolué pour représenter ces concepts physiques abstraits, il est probable que ceux-ci aient pu s'acquérir en se greffant aux représentations du monde physique, qui elles, étaient déjà présentes avant l'entrée à l'école. En effet, la « signature neurale » (Mason et Just, 2016) qui a été observée pour les différents concepts en physique semble indiquer que l'apprentissage de la physique permettrait de développer des concepts abstraits qui s'ancrent dans le cerveau en réutilisant des réseaux de neurones associés aux représentations du monde physique. Cette interprétation a mené les chercheurs de cette étude à proposer que l'apprentissage de la physique impliquerait également un processus de recyclage neuronal. Cette

hypothèse fait ainsi émerger une piste intéressante qui pourrait permettre d'expliquer les erreurs fréquentes rencontrées par les élèves lors de l'apprentissage de la physique. En effet, les réseaux de neurones associés aux représentations du monde que détiennent les élèves ont été construits à partir des observations que ceux-ci ont faites au contact de leur environnement, avant l'apprentissage formel de la physique. Or, il est possible que ces observations aient mené à la formation de réseaux de neurones associés à des conceptions intuitives, qui ne sont pas nécessairement en accord avec les lois abstraites de la physique. Le fait de recycler en partie ces réseaux de neurones afin qu'ils se spécialisent pour intégrer certains concepts en physique pourrait donc mener à un défi supplémentaire. De la même façon que les propriétés de généralisation en miroir constituaient un obstacle à l'apprentissage de la lecture en nuisant à la discrimination des lettres miroir, les conceptions intuitives portant sur certains phénomènes naturels pourraient rendre plus difficile l'intégration de concepts en physique qui sont possiblement moins intuitifs. Cette analyse demeure toutefois encore de l'ordre de la supposition, puisqu'à notre connaissance, il n'existe aucune recherche ayant étudié spécifiquement la relation entre le recyclage neuronal et certains apprentissages scientifiques réputés comme étant difficiles.

Dans le même ordre d'idées, il serait possible d'imaginer que le recyclage neuronal ait un rôle à jouer dans l'apprentissage d'autres concepts abstraits qui pourraient ultimement se greffer à des représentations ou des intuitions déjà présentes dans le cerveau humain. Dehaene (2008) suggère ainsi que le recyclage neuronal pourrait être impliqué dans l'apprentissage de concepts en géographie, en philosophie, en histoire ou même en grammaire. À l'heure actuelle, il ne semble toutefois pas y avoir de recherches s'étant penchées sur cette question.

La théorie du recyclage neuronal (Dehaene, 2007) postule qu'en raison de la façon dont le cerveau est organisé, ce dernier présente des prédispositions pour se modifier d'une

certaine façon plutôt que d'une autre, notamment en spécialisant une région très précise de son cerveau pour chaque apprentissage. La structure innée de l'organisation cérébrale poserait ainsi un cadre délimitant un éventail de possibilités et contraignant les apprentissages. Cette idée implique que malgré l'étonnante flexibilité du cerveau, il ne serait peut-être pas possible de tout apprendre de n'importe quelle façon, ou du moins avec autant de facilité. Cela suggère que certaines approches d'enseignement seraient potentiellement plus compatibles que d'autres avec l'architecture du cerveau (Dehaene, 2007; Brault Foisy, Masson et Dehaene, 2016). Afin d'explorer cette idée, la prochaine section abordera les effets de différentes interventions pédagogiques sur le fonctionnement cérébral, et plus précisément sur la spécialisation fonctionnelle qui prend place lors du recyclage neuronal.

2.2 Effets de l'enseignement sur le recyclage neuronal

Les informations concernant la façon dont se met en place le recyclage neuronal pour différents apprentissages scolaires sont pertinentes pour l'éducation, car elles renseignent sur les transformations qui s'opèrent dans le cerveau des élèves durant ces apprentissages. À la lumière de ces informations, il ressort que l'architecture préalable du cerveau impose de fortes contraintes à la façon dont certains apprentissages culturels peuvent se réaliser. Les deux exemples principaux discutés ci-haut, la lecture et l'arithmétique, nécessitent en effet de recycler des régions bien précises du cerveau à ces nouveaux usages. Cela laisse entendre que l'enseignement pourrait bénéficier d'une prise en compte des caractéristiques initiales du cerveau et des contraintes qui leur sont associées.

Dans cette optique, il devient intéressant de vérifier si l'enseignement peut influencer le fonctionnement cérébral et plus précisément le recyclage neuronal. La présente section propose donc un état des connaissances à ce sujet. Puisque les études qui seront

abordées dans cette section concernent plus directement la question de recherche sous-jacente à ce projet, une attention particulière sera portée à la méthodologie de celles-ci, ce qui permettra par la suite de mieux justifier l'ancrage des choix méthodologiques de ce projet.

À notre connaissance, il n'existe aucune recherche ayant mesuré les effets de l'enseignement sur le recyclage neuronal dans le contexte de l'arithmétique. En fait, les seules recherches s'étant penchées sur l'effet de l'enseignement sur le recyclage neuronal l'ont fait dans le contexte de l'apprentissage de la lecture, possiblement parce qu'il s'agit de la discipline pour laquelle les mécanismes cérébraux ont été les plus explorés jusqu'à maintenant. Cependant, bien que l'apprentissage de la lecture sur le plan cérébral ait fait l'objet de nombreuses recherches dans les dernières années, il semble qu'il en reste encore à découvrir sur la façon dont cette spécialisation cérébrale émerge et se développe (Centanni *et al.*, 2019). À ce jour, peu de recherches ont en effet tenté de comprendre l'impact de l'enseignement sur le développement de la compétence à lire en l'étudiant au niveau du cerveau. Pour mieux comprendre le lien entre l'enseignement et le recyclage neuronal, il devient donc important d'aborder les premiers résultats de recherches ayant permis d'observer l'effet de certaines interventions pédagogiques en lecture sur le fonctionnement cérébral.

Dans la pratique, il existe différentes façons d'enseigner aux élèves à lire les mots écrits. Les interventions pédagogiques qui peuvent être réalisées à cette fin diffèrent notamment au niveau de l'unité d'analyse du mot sur laquelle l'attention des élèves est dirigée : lettres isolées, relations entre graphèmes et phonèmes, ensemble de lettres, rimes, forme entière du mot, etc. (Yoncheva *et al.*, 2010). La façon dont l'attention de l'élève est dirigée durant la lecture d'un mot, notamment par le biais des consignes qui sont données par l'enseignant ou par la nature des exercices réalisés en classe, pourrait donc influencer l'apprentissage (McCandliss *et al.*, 2003), ce que laissent déjà entendre

plusieurs recherches s'étant intéressées à l'acquisition de la lecture sur le plan comportemental en termes de performance et de fluidité par exemple (Ehri, Nunes, Stahl et Willows, 2001). Cependant, les effets de cette variable liée à l'orientation de l'attention de l'élève ont été peu étudiés sur le plan cérébral. Comme il s'agit d'un aspect sur lequel l'enseignant a la possibilité d'agir, il semble pertinent de s'intéresser à son impact possible sur fonctionnement cérébral et le recyclage neuronal. À l'heure actuelle, la plupart des recherches ayant mesuré les effets d'interventions en lecture sur le plan cérébral se sont surtout focalisées sur la spécialisation de la région occipito-temporale gauche, qui est centrale au processus de recyclage neuronal.

Une recherche (Brem *et al.*, 2010) s'est intéressée à la façon dont émergeait la spécialisation de la région occipito-temporale gauche chez 32 élèves droitiers (15 garçons, 17 filles) de niveau préscolaire ($M = 6,40$ ans; $ET = 0,01$ qui ne savaient pas encore lire et dont la langue maternelle était l'allemand. Ces derniers ont réalisé à la maison un entraînement s'échelonnant sur huit semaines (total d'environ 3,6 heures) durant lequel on les faisait participer à un jeu informatisé, le Graphogame (Lyytinen, Ronimus, Alanko, Poikkeus et Taanila, 2007), impliquant d'associer systématiquement des graphèmes à des phonèmes. En guise de mesure contrôle, ces mêmes élèves réalisaient également un entraînement informatisé qualifié de non linguistique lié à la connaissance des nombres. Les deux entraînements étaient équivalents en termes de durée et d'apparence visuelle ainsi qu'au plan de la motivation qu'ils suscitaient. L'ordre de réalisation des deux entraînements était contrebalancé de sorte qu'un groupe de participants réalisait d'abord l'entraînement avec le Graphogame et ensuite l'entraînement contrôle, alors qu'un deuxième groupe procédait dans l'ordre inverse. Les participants étaient assignés aléatoirement à chacun des groupes. Des mesures de l'activité cérébrale des 32 participants étaient prises à l'aide de l'électroencéphalographie dans le cadre d'une tâche où ils devaient regarder des mots présentés à l'écrit. Un sous-groupe constitué de 16 de ces participants prenait

également part à une collecte de données utilisant l'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle (IRMf). Les mesures de l'activité cérébrale étaient collectées à trois moments : avant l'entraînement (T1), à la suite du premier entraînement (T2) ainsi qu'à la suite du 2^e entraînement (T3). Les principaux résultats de cette recherche montrent qu'une intervention pédagogique mettant l'accent, de façon intensive et systématique, sur l'établissement de correspondances entre les signes écrits et les sons permet de faire émerger une spécialisation de la région de la forme visuelle des mots chez des enfants de niveau préscolaire. D'abord, les données cérébrales collectées à l'aide de l'IRMf montrent de façon précise que, comparativement à l'entraînement contrôle, l'entraînement graphophonétique a notamment mené à une augmentation de l'activité cérébrale dans la région occipito-temporale gauche. De façon convergente, les résultats obtenus à l'aide de l'EEG, à la suite d'une analyse de localisation de sources, pointent aussi vers une mobilisation plus importante de la région occipito-temporale gauche à la suite de l'entraînement de type graphophonétique. Ces résultats indiquent qu'un entraînement visant l'apprentissage des correspondances entre les graphèmes et les phonèmes chez des enfants non lecteurs de niveau préscolaire permet de faire émerger, après moins de quatre heures d'entraînement, une spécialisation de la région de la forme visuelle des mots. Il semblerait donc qu'une intervention dirigeant l'attention des participants vers le niveau d'analyse lettres-sons ait un effet sur le fonctionnement cérébral, et plus spécifiquement sur la mobilisation de la région cérébrale qui doit être recyclée pour apprendre à lire.

Cependant, bien qu'ils mettent en lumière les effets d'une telle intervention sur le fonctionnement cérébral, ces résultats ne permettent pas d'évaluer si une intervention de type graphophonétique permet de mobiliser davantage qu'une autre intervention visant la lecture de mots la région occipito-temporale gauche, puisque l'entraînement graphophonétique était comparé, dans le cadre de cette recherche, à un entraînement contrôle qui n'était pas du tout en lien avec la lecture. Afin de cerner l'impact relatif

de ce type d'intervention, il semble donc pertinent de chercher à comparer les effets de différentes interventions ayant le même objectif d'apprentissage, la lecture de mots, mais dirigeant l'attention des participants sur des niveaux d'analyse du mot différents.

D'autres recherches ont comparé l'impact de différentes interventions en lecture sur le fonctionnement cérébral, cette fois auprès de lecteurs adultes (Bitan, Manor, Morocz et Karni, 2005; Xue, Chen, Jin et Dong, 2006; Yoncheva *et al.*, 2010). Dans l'ensemble, ces recherches ont permis de démontrer que des interventions de nature différente provoquaient une activité cérébrale différente. Dans ces recherches, les participants apprenaient à lire des mots fictifs, issus d'un nouvel alphabet créé par les chercheurs, ce qui les plaçait dans une situation d'apprentissage similaire à celle d'apprentis-lecteurs. Les interventions différaient quant au niveau d'analyse sur lequel l'attention des participants était dirigée.

Par exemple, Xue *et al.*, (2006) ont mené une recherche auprès de 12 participants droitiers (6 hommes, 6 femmes) âgés de 18 à 21 ans dont la langue maternelle était le chinois mandarin en utilisant un langage artificiel dont les symboles pouvaient s'apparenter visuellement et phonologiquement à ceux du hangul (écriture associée à la langue coréenne). Ces chercheurs ont notamment comparé, à l'aide de l'IRMf, deux types d'entraînement dans le cadre desquels l'attention des participants était dirigée 1- vers l'apparence visuelle des symboles ou 2- vers la phonologie associée à chacun des symboles écrits. Chaque entraînement était d'une durée équivalente de 20 heures (5 jours par semaine, 2 heures par jour). De façon générale, les résultats de cette étude montrent une diminution de l'activité cérébrale dans les régions occipito-temporales bilatérales (gauche et droite) à la suite de l'entraînement portant sur la forme visuelle entière du symbole écrit. À l'opposé, un entraînement axé sur la phonologie du symbole menait entre autres à une mobilisation plus importante de ces régions cérébrales. Ce type d'entraînement était aussi associé à une plus grande mobilisation d'autres régions

cérébrales de l'hémisphère gauche impliquées dans le traitement du langage. Il est d'abord intéressant de constater que des interventions distinctes portant sur un même objet d'apprentissage, différant dans ce cas-ci quant au niveau d'analyse sur lequel l'attention des participants était dirigée, peuvent avoir des incidences différentes sur le fonctionnement cérébral. Cela laisse entendre que la nature de l'intervention mise en place peut effectivement jouer un rôle dans les régions cérébrales qui sont mobilisées ultérieurement durant la lecture. L'enseignement pourrait ainsi avoir un impact sur le fonctionnement cérébral. Dans un deuxième temps, il semble également qu'une intervention impliquant une composante phonologique soit associée à une activité cérébrale plus importante dans la région occipito-temporale de l'hémisphère gauche, comparativement à une intervention portant sur l'apparence visuelle d'un symbole écrit, ce qui laisse entendre que la composante phonologique pourrait être facilitante dans la spécialisation de cette région et dans la mise en place du recyclage neuronal.

Dans le même esprit, une deuxième recherche menée par Yoncheva et ses collaborateurs (2010) a permis de comparer les effets de deux interventions informatisées visant l'apprentissage de la lecture de mots fictifs. Dans cette étude, l'effet d'une intervention phonique (*phonics*) mettant l'accent de manière explicite sur les correspondances entre les signes écrits et les sons (en anglais), était comparée à l'effet d'une intervention dite globale (*whole-word*), visant plutôt la reconnaissance de mots entiers en tant qu'entités indivisibles. Pour ce faire, 30 participants droitiers anglophones (10 hommes, 20 femmes) étaient aléatoirement répartis en deux groupes de 15 participants équivalents en termes d'âge et de sexe. Chaque groupe correspondait à l'une des deux interventions. Le système d'écriture créé par les chercheurs consistait en plusieurs caractères (mots) formés de trois lettres (graphèmes), dont chacune était associée à un son (phonème). Ces lettres (graphèmes) n'étaient détectables que lorsque les consignes formulées attiraient l'attention sur celles-ci. Ces lettres s'écrivaient de bas en haut et les traits et les courbes de chacune se touchaient de sorte que chaque caractère

possédait un contour global continu. Le fait que les lettres étaient dissimulées à l'intérieur d'un caractère et que l'écriture n'était pas conventionnelle (écriture de bas en haut) permettait d'isoler l'effet respectif de chacune des interventions en révélant à seulement l'un des deux groupes la possibilité de lire les caractères en utilisant une conversion graphophonologique.

Les interventions visaient toutes deux à ce que les participants apprennent à associer un caractère présenté visuellement à un mot prononcé oralement s'apparentant à l'anglais. Les interventions étaient d'une durée totale de 20 minutes. Au tout début des interventions, une phrase de consignes prescrivait l'une ou l'autre des deux stratégies de lecture du caractère (phonique ou globale) en dirigeant l'attention des participants sur des unités lexicales différentes. Ainsi, il était demandé au groupe associé à l'intervention globale de lier chaque caractère dans son ensemble avec le mot prononcé à l'oral, tandis que le groupe associé à l'intervention phonique devait diriger son attention sur l'association de chacune des lettres (graphèmes) incluses dans les caractères présentés avec les sons oraux (phonèmes) contenus dans chacun des mots prononcés. Au total, les participants devaient apprendre 16 associations et chacune de celles-ci était répétée 20 fois. À la suite de l'intervention, les participants de chaque groupe devaient réaliser une tâche identique de vérification de lecture, laquelle consistait à leur présenter un caractère visuel jumelé à un mot prononcé oralement. Les participants devaient indiquer si l'association entre le caractère visuel et le mot oral était correcte ou incorrecte. Pour évaluer le transfert alphabétique, en plus des caractères qui étaient présents lors de l'entraînement, la tâche de vérification incluait également de nouveaux caractères utilisant le même système d'écriture, qui pouvaient donc être décodables en utilisant les mêmes correspondances entre graphèmes et phonèmes. Des mesures de l'activité cérébrale étaient enregistrées à l'aide de l'EEG pendant que les participants réalisaient la tâche afin d'identifier les régions cérébrales activées lors de la lecture.

Au niveau comportemental, les résultats obtenus lors de la tâche de vérification de lecture pour les caractères entraînés montrent un avantage significatif au niveau de la performance (exactitude des réponses fournies en pourcentage) pour l'intervention globale comparativement à l'intervention phonique (respectivement $M = 95,1$; $ET = 3,9$ vs. $M = 89,2$; $ET = 5,6$). Ce résultat était prévisible étant donné le nombre plus important d'éléments à mémoriser dans le cadre de l'intervention phonique. Pour les caractères de transfert, les participants de l'intervention globale ont cependant obtenu un résultat significativement plus bas que ceux de l'intervention phonique (respectivement $M = 58$; $ET = 8,9$ vs. $M = 78,5$; $ET = 7,6$), ce qui est logique considérant qu'ils devaient répondre au hasard. Au niveau cérébral, une plus grande latéralisation à gauche des activations cérébrales dans la région occipito-temporale a été observée pour le groupe associé à l'intervention phonique, comparativement au groupe associé à l'intervention globale, qui présentait plutôt une activation davantage latéralisée à droite, et ce, tant pour les caractères entraînés que pour les caractères de transfert. Cette latéralisation à gauche de l'activité cérébrale chez le groupe associé à l'intervention phonique, encore plus marquée pour les mots entraînés, correspond davantage au profil cérébral habituel propre au lecteur expert (Schlaggar et McCandliss, 2007).

Les résultats obtenus dans le cadre de cette étude montrent donc que le fait d'insister sur l'établissement explicite de correspondances entre les graphèmes et les phonèmes engendre une activité cérébrale près de celle liée à l'expertise en lecture, c'est-à-dire latéralisée dans l'hémisphère gauche du cerveau. Un entraînement à reconnaître un mot dans sa forme globale était plutôt associé à une activité cérébrale prononcée dans l'hémisphère droit et mobilisait donc un circuit neuronal dont l'implication est généralement reconnue diminuer lors de l'apprentissage de la lecture (Turkeltaud, Gareau, Flowers, Zeffiro et Eden, 2003) et qui est même parfois associé aux difficultés en lecture (Monzalvo *et al.*, 2012; Richlan *et al.*, 2011; Temple *et al.*, 2003). Selon les

chercheurs, ces résultats semblent indiquer que le fait d'orienter l'attention sur un niveau d'analyse différent (correspondances entre les graphèmes et les phonèmes vs forme entière du mot) dans la présentation visuelle d'un mot peut avoir un impact sur l'apprentissage ainsi que sur la latéralisation à gauche de l'activité cérébrale. Ces résultats convergent donc avec ceux de Xue et ses collaborateurs (2006) puisqu'ils démontrent également que la façon dont l'attention du participant est orientée sur le mot à lire peut influencer l'activité cérébrale de ce dernier. Les résultats obtenus par Yoncheva *et al.* (2010) laissent aussi entendre que la composante phonologique jouerait un rôle dans la mobilisation des régions cérébrales en lien avec la lecture, qui sont principalement situées dans l'hémisphère gauche du cerveau. En effet, le fait de diriger son attention sur un niveau d'analyse du mot qui est plus fin et de se concentrer systématiquement sur l'établissement de correspondances entre les unités composant le caractère écrit et leur son respectif, mènerait à une activité cérébrale plus près de celle qui est habituellement observée chez les lecteurs plus aguerris.

Ces résultats ont d'ailleurs été reproduits dans une étude plus récente (Yoncheva, Wise et McCandliss, 2015) utilisant cette fois un devis intra-sujets, où 16 participants droitiers (8 hommes, 8 femmes, $M = 21,7$ ans) étaient entraînés à lire deux scripts similaires (Yoncheva *et al.*, 2010) : pour un script, les caractères étaient entraînés selon une intervention phonique et pour l'autre script, les caractères étaient entraînés selon une intervention globale. Les caractères du second script étaient conçus de telle sorte qu'il n'était pas possible de les décoder via l'apprentissage des correspondances graphèmes-phonèmes réalisé avec le premier script. Les interventions phonique et globale respectaient la même procédure que celle établie précédemment (Yoncheva *et al.*, 2010). La même tâche de vérification de lecture était également utilisée, durant laquelle des mesures de l'activité cérébrale prises par EEG étaient enregistrées. En plus des caractères entraînés, des caractères de transfert étaient utilisés dans la tâche de lecture. Conformément aux résultats obtenus précédemment par la même équipe de

recherche (Yoncheva *et al.*, 2010), les résultats de cette étude indiquent que l'exactitude des réponses était significativement plus élevée pour le script entraîné selon l'intervention globale, comparativement à celui entraîné selon l'intervention phonique. Sur le plan cérébral, la lecture des caractères du script associé à l'intervention phonique était liée à une activité cérébrale qui était davantage latéralisée à gauche dans la région occipito-temporale, comparativement à la lecture des caractères entraînés selon l'intervention globale qui était associée à une activité cérébrale plus fortement latéralisée à droite. La latéralisation à gauche de l'activité cérébrale pour le script entraîné selon l'intervention phonique était encore plus prononcée pour les caractères de transfert.

Les résultats de ces recherches sont intéressants pour le monde de l'éducation parce qu'ils mettent en évidence le rôle de l'enseignement dans l'apprentissage de la lecture : le fait de diriger explicitement l'attention des participants sur un niveau d'analyse précis (au niveau de l'association entre les lettres et les sons, ou encore au niveau de la forme globale du mot) semble avoir un impact sur l'activité cérébrale de la personne qui apprend. Toutefois, malgré leur pertinence pour le milieu de l'éducation, ces recherches détiennent des limites importantes. L'étude de Brem et ses collaborateurs (2010) présentait l'avantage de fournir des informations permettant de mieux comprendre si une intervention pédagogique pouvait faciliter la spécialisation de la région occipito-temporale gauche, puisqu'elle était menée auprès d'enfants qui n'avaient jamais appris à lire. Les résultats de cette étude laissaient entendre qu'une intervention ciblant l'apprentissage systématique des correspondances graphèmes-phonèmes menait à une mobilisation accrue de la région occipito-temporale gauche. Cependant, cette recherche ne permettait pas de cerner l'effet relatif de l'intervention mise en place puisque celle-ci n'était pas comparée à une autre intervention visant le même objet d'apprentissage.

La recherche de Xue et ses collaborateurs (2006) ainsi que celles de Yoncheva et son équipe (2010, 2015) ne présentaient pas cette limite puisqu'elles comparaient deux interventions visant l'apprentissage de la lecture de mots, qui différaient quant au niveau d'analyse sur lequel l'attention des participants était dirigée. Toutefois, ces recherches ont utilisé un système d'écriture fictif, ce qui constitue une situation moins réaliste de lecture. Ces recherches présentent également une limite importante liée à l'âge des participants. En effet, comme elles ont été menées auprès de participants adultes qui détenaient vraisemblablement déjà des connexions neuronales associées à la lecture avant même de vivre l'intervention pédagogique proposée, il n'est pas certain que les mêmes résultats seraient obtenus avec des enfants n'ayant pas encore appris à lire (Brem *et al.*, 2010). En l'occurrence, ces recherches renseignent sur les effets des interventions sur le fonctionnement cérébral, mais ne permettent pas de déterminer leurs effets spécifiques sur la spécialisation de la région occipito-temporale gauche et sur le recyclage neuronal, ce processus ayant déjà été mis en place durant l'apprentissage antérieur de la lecture qu'ont fait les participants. Il n'existe donc pas à ce jour d'étude comparant les effets de différentes interventions visant l'apprentissage de la lecture de mots sur la spécialisation de la région occipito-temporale gauche, menée auprès de participants n'ayant pas encore débuté leur apprentissage formel de la lecture. C'est précisément ce vide dans les connaissances scientifiques que cherche à combler le présent projet doctoral.

2.3 Hypothèse de recherche

L'état des connaissances scientifiques présenté dans le cadre théorique a permis de mettre en évidence que l'architecture initiale du cerveau avant un apprentissage impose des contraintes à la façon dont ce dernier peut prendre place sur le plan cérébral. Ces contraintes cérébrales peuvent ainsi rendre certains apprentissages plus difficiles à réaliser. C'est possiblement le cas pour les apprentissages scolaires nécessitant de faire

preuve de recyclage neuronal, comme la lecture et l'arithmétique. Il semble donc important de vérifier si des approches d'enseignement distinctes qui sont associées à un apprentissage nécessitant du recyclage neuronal peuvent avoir un impact différent sur le fonctionnement cérébral et sur le recyclage neuronal. Le contexte de l'apprentissage de la lecture semble être le plus propice afin d'étudier cette question puisque la lecture représente l'apprentissage scolaire pour lequel les mécanismes cérébraux ont été les plus étudiés par la recherche et sont aujourd'hui les mieux connus. Il s'agit également de la seule discipline pour laquelle il existe déjà des recherches ayant cherché à étudier les effets de différentes interventions pédagogiques sur le fonctionnement cérébral, plus précisément sur la spécialisation de la région occipito-temporale gauche. Bien que ces recherches présentent certaines limites ayant été discutées ci-haut, elles posent tout de même certains jalons sur lesquels s'appuient les hypothèses de la présente recherche.

S'inscrivant dans la continuité de ces études, particulièrement celle de Yoncheva et ses collaborateurs (2010), ce projet visera à déterminer si deux interventions pédagogiques distinctes en lecture, qui se différencient quant à l'unité d'analyse du mot sur laquelle l'attention du participant est dirigée, ont des effets différents sur la la spécialisation de la région occipito-temporale gauche faisant partie du processus de recyclage neuronal.

De façon plus spécifique, il s'agira donc de déterminer les effets respectifs de chacune des interventions sur le fonctionnement cérébral, et plus spécifiquement sur la spécialisation de cette région. En se basant sur la littérature actuelle, cette recherche vérifiera l'hypothèse selon laquelle une intervention pédagogique orientant l'attention de lecteurs novices vers les correspondances entre les graphèmes et les phonèmes aura pour effet de faciliter davantage la spécialisation de la région occipito-temporale gauche, comparativement à une intervention orientant l'attention vers la forme entière du mot. Dans le cadre d'une tâche cognitive en lecture, une confirmation de cette

hypothèse se traduirait opérationnellement par une plus grande activation cérébrale dans l'hémisphère gauche du cerveau, plus précisément dans la région occipito-temporale gauche liée à l'expertise en lecture, chez les participants dont l'attention aura été orientée vers l'unité d'analyse des correspondances graphèmes-phonèmes. La mesure de l'activité cérébrale de la région occipito-temporale gauche sera donc utilisée comme indice d'une amorce de recyclage neuronal dans cette région du cerveau. Il est néanmoins important de spécifier que la spécialisation de la région occipito-temporale gauche ne permet pas à elle seule de se prononcer sur la mise en place du recyclage neuronal. Pour ce faire, en plus de constater une spécialisation de la région occipito-temporale gauche, il faudrait également observer une diminution de l'activité cérébrale pour d'autres catégories d'objets, ce qui ne fait pas l'objet de la présente thèse.

CHAPITRE III

MÉTHODOLOGIE

Cette recherche a pour objectif principal de vérifier, à l'aide de la neuroimagerie, si des approches d'enseignement distinctes qui sont associées à un apprentissage nécessitant du recyclage neuronal, dans ce cas-ci la lecture, peuvent avoir un impact différent sur le fonctionnement cérébral et sur la mise en place du recyclage neuronal. Dans un premier temps, ce chapitre présente le devis général du projet de recherche afin de permettre au lecteur d'avoir une vue d'ensemble du déroulement du projet. Puis, les points suivants sont abordés : les participants (sélection, recrutement et échantillonnage), la description des interventions mises en place, la collecte de données (justification du choix de la technique de neuroimagerie, description des tâches cognitives utilisées et d'une séance type de neuroimagerie) et les modalités d'analyse des données sont discutées. Finalement, les considérations éthiques d'usage (consentement et confidentialité) sont abordées.

3.1 Devis général du projet de recherche

Cette section vise à fournir un aperçu du déroulement général du projet de recherche. Chacun des aspects du projet sera par la suite détaillé dans les sections qui suivent. Comme ce projet avait pour objectif central de mesurer les effets de deux interventions en lecture sur la spécialisation de la région occipito-temporale gauche, deux moments de collecte de données ont été prévus (devis de type prétest et posttest) entre lesquels

ont eu lieu deux types d'interventions (« phonologique » et « globale ») qui s'échelonnaient sur cinq semaines consécutives. La collecte de données en neuroimagerie en prétest et posttest a eu lieu dans un intervalle de moins de deux semaines, respectivement avant le début et après la fin des interventions. Bien qu'il aurait été possible de réaliser un devis incluant seulement un posttest, nous avons fait le choix de réaliser également un prétest et ce, pour deux raisons. La première raison renvoie directement à la question de recherche : comme cette recherche souhaite observer les processus de recyclage neuronal découlant des interventions, il était important d'avoir un portrait de cette organisation initiale. La deuxième raison est que les recherches en neuroimagerie présentent très souvent un devis incluant à la fois un prétest et un posttest, car la puissance statistique associée à une comparaison pré/post au sein d'un même groupe est plus élevée que pour une comparaison entre les groupes. Considérant que cette recherche est la première à comparer les effets de deux enseignements sur l'activité cérébrale de lecteurs novices, ce type de devis maximisait les chances de détecter une différence pour chacune des interventions. Il s'agissait donc aussi d'un choix fait par souci de prudence. Nous sommes d'avis que les avantages découlant du choix de réaliser un prétest étaient supérieurs aux possibles inconvénients associés à cette décision, mais il s'agit d'une limite à cette étude.

Les participants recrutés ont été répartis de façon aléatoire en deux groupes, chacun associé à un type d'intervention. Les interventions visaient toutes deux à ce que les participants apprennent à lire un nombre limité de mots. Elles se différençaient quant à l'unité d'analyse du mot sur laquelle l'attention du participant était dirigée. Les données qui ont été collectées en prétest et en posttest étaient de natures comportementales (évaluation des habiletés et des prédicteurs de la lecture en prétest) et cérébrales (mesures de l'activité cérébrale en prétest et posttest). Les données comportementales du prétest ont d'abord servi à sélectionner les participants, mais elles ont également permis de s'assurer *a posteriori* que les deux groupes étaient équivalents.

La collecte des données comportementales a été réalisée avant la première séance d'imagerie. Les interventions en lecture ont eu lieu entre les deux moments de collecte des données cérébrales.

Le devis général du projet de recherche est présenté à la figure 3.1. Plusieurs des considérations méthodologiques de ce projet sont également présentées et discutées dans le cadre d'un article (Blanchette Sarrasin, Brault Foisy, Auclair, Riopel et Masson, 2020).

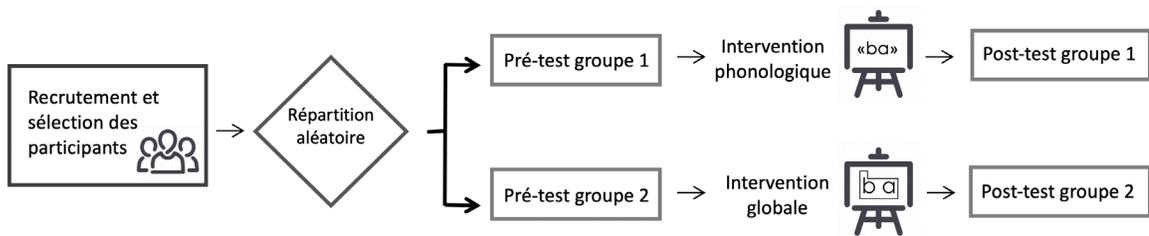


Figure 3.1 Devis général du projet de recherche.

3.2 Participants

Cette section permet dans un premier temps de prendre connaissance des caractéristiques des participants de ce projet. Les modalités de recrutement et d'échantillonnage sont ensuite détaillées. Finalement, la façon dont ont été formés les deux groupes expérimentaux est présentée.

3.2.1 Caractéristiques des participants

Étant donné que ce projet de recherche vise à vérifier si l'enseignement peut influencer la mise en place des mécanismes cérébraux associés à la lecture, principalement le recyclage neuronal, il importait que la population de l'étude soit constituée de

participants qui ne savent pas encore lire. En effet, des participants qui sauraient lire auraient vraisemblablement déjà développé des réseaux de neurones associés à la lecture. Cela ferait en sorte qu'il serait alors difficile d'étudier la mise en place des mécanismes cérébraux en lien avec cet apprentissage. Pour ces raisons, les participants de ce projet étaient des élèves de niveau préscolaire qui n'avaient pas encore entamé leur apprentissage de la lecture de façon formelle et qui détenaient le plus bas niveau de lecture possible, mais qui ne présentaient par ailleurs aucun trouble d'apprentissage ou d'attention diagnostiqué ou rapporté. Au moment du prétest, l'âge de ces participants variait entre 5,3 et 6,5 ans, la moyenne étant de 5,9 ans ($ET = 0,3$). Pour s'assurer que les participants ne savaient pas encore lire et pour évaluer certains prédicteurs de la lecture, plusieurs tests standardisés ont été utilisés. Ces tests sont abordés plus en détail à la section 3.2.3.

Dans le cadre d'une recherche impliquant l'utilisation de la neuroimagerie, il importe de réduire au minimum la variabilité cérébrale entre les sujets. Plusieurs facteurs peuvent être à l'origine de cette variabilité tels que le l'âge (en raison de la maturation du cerveau) et, dans une moindre importance, le fait d'être gaucher ou droitier (Narr *et al.*, 2007; Mazoyer *et al.*, 2014). Il semblerait en effet que les réseaux cérébraux associés à la lecture et au langage ne soient pas toujours localisés au même endroit dans le cerveau des droitiers et des gauchers : chez environ 22 % des gauchers, ces réseaux neuronaux sont localisés dans l'hémisphère droit ou de manière bilatérale dans les deux hémisphères (Mazoyer *et al.*, 2014). Bien que ce pourcentage soit peu élevé, nous avons choisi de sélectionner uniquement des participants droitiers dans le cadre de ce projet afin de réduire au maximum la variabilité cérébrale. Pour s'assurer de cette latéralité, la question était d'emblée posée aux parents des enfants qui souhaitaient participer dès le début du processus de recrutement. Considérant le jeune âge des participants, il était prévu en cas de doute qu'un test de préférence manuelle (Auzias, 1975) proposant des manipulations réelles d'objets puisse être réalisé afin de

déterminer si un participant pouvait prendre part à l'étude (le score obtenu à ce test est un quotient de latéralité indiquant l'orientation et le degré de la préférence manuelle). Cela n'a toutefois pas été nécessaire.

3.2.2 Modalités de recrutement et échantillonnage

Au total, notre échantillon était constitué de 37 participants recrutés dans les écoles publiques et privées de la grande région de Montréal ayant manifesté leur intérêt à prendre part au projet. Le recrutement a eu lieu entre les mois de septembre et de décembre 2015. La procédure de recrutement comprenait d'abord une phase de diffusion du projet par le biais d'une vidéo de présentation (Figure 3.8-A) s'adressant aux enseignants de niveau préscolaire dont les élèves étaient susceptibles de prendre part au projet (vidéo à l'adresse suivante : https://www.youtube.com/watch?v=RSgslA0_dt8). Cette vidéo présentait, de façon vulgarisée, l'objectif du projet de recherche et ce en quoi consistait concrètement la participation au projet. Cette vidéo a été mise en ligne au mois de septembre 2015 sur le compte *YouTube* du Laboratoire de recherche en neuroéducation (LRN, UQAM) et comptait plus de 2500 visionnements en date du 1^{er} janvier 2018. La promotion de la vidéo a notamment été faite via les comptes *Facebook* et/ou *Twitter* suivants : Laboratoire de recherche en neuroéducation, Association pour la recherche en neuroéducation (ARN), Équipe de recherche en enseignement scientifique et technologique (EREST, UQAM), Enseignants et enseignantes du Québec. Un courriel de présentation du projet incluant un lien vers la vidéo a également été envoyé à toutes les commissions scolaires de la grande région de Montréal, à la Fédération des établissements d'enseignement privés ainsi qu'à plusieurs associations, telles que l'Association québécoise d'enseignement primaire (AQEP) et l'Association d'éducation préscolaire du Québec (AÉPQ). Dans ce courriel, ceux-ci étaient invités à partager la vidéo du projet via leurs propres réseaux de diffusion. L'objectif était que la vidéo soit visionnée par un très grand nombre de personnes de

façon à rejoindre le plus d'enseignants possible et à offrir une chance aux élèves souhaitant participer de pouvoir le faire.

À la suite du visionnement de cette vidéo, les enseignants intéressés à ce que leurs élèves puissent prendre part au projet étaient invités à remplir un bref formulaire d'inscription, disponible sur le site du LRN. Plus de 60 enseignants ont rempli ce formulaire d'inscription et 18 parents ayant vu la vidéo ont également manifesté leur intérêt à ce que leur enfant participe, en indiquant les coordonnées de l'enseignant de leur enfant. Les enseignants ont ensuite été joints par courriel afin de valider leur intérêt et il leur était d'abord proposé qu'un atelier portant sur le cerveau soit réalisé auprès de tous les élèves de leur classe. Cet atelier, d'une durée d'environ 1 heure abordait ce qu'est le cerveau et la façon dont il fonctionne. Pour ce faire, un personnage de cerveau surnommé « Toc-Toc » (Figure 3.8-B) était présenté aux élèves et était utilisé afin de leur partager de façon ludique un certain nombre d'informations. L'atelier permettait notamment aux élèves de comprendre que leur cerveau est constitué d'un très grand nombre de neurones, que ces neurones travaillent de concert et permettent d'accomplir différentes tâches. L'atelier expliquait aussi aux élèves comment il est possible de voir ce qui se passe dans le cerveau en leur présentant des images d'un appareil d'IRMf et il leur permettait même de comprendre comment se déroule une séance d'IRMf, laquelle était imagée à la façon d'un voyage dans l'espace. Au total, 44 ateliers ont été animés dans des classes de niveau préscolaire de 21 écoles de la grande région de Montréal, ce qui signifie que près de 800 élèves ont assisté à cet atelier. En raison de contraintes logistiques associées à la planification des interventions, 16 classes ont été placées sur une liste d'attente, car elles étaient situées plus à l'extérieur de Montréal ce qui aurait complexifié la mise en place des interventions auprès des élèves ainsi que le déplacement ultérieur des parents pour les deux séances de neuroimagerie.

À la suite de l'atelier, des documents d'information présentant les éléments centraux du projet de recherche ainsi que les critères de sélection des participants (1- livret destiné à l'enfant, 2- dépliant destiné aux parents et 3- coupon-réponse, voir *Annexe A*) étaient envoyés aux parents de tous les enfants du groupe (Figure 3.8-C). Le personnage de « Toc-Toc » figurait sur ces documents d'information afin que l'enfant ait un point de repère familier lorsqu'il les consulte. Les parents souhaitant que leur enfant participe au projet renvoyaient le coupon-réponse à l'enseignant de leur enfant, et celui-ci compilait les informations reçues dans un formulaire en ligne sécurisé (dont les données étaient accessibles uniquement au chercheur responsable du projet avec un mot de passe). Au total, 116 parents ont manifesté leur intérêt. Ces parents étaient par la suite contactés par téléphone afin d'établir un premier contact, de leur expliquer de vive voix la façon dont se déroulait le projet et de répondre à leurs questions au besoin. Un formulaire de dépistage visant à s'assurer que leur enfant ne présentait pas de contre-indication médicale pour participer à une séance de neuroimagerie était également rempli avec eux par téléphone. Si l'enfant ne présentait pas de contre-indication et correspondait aux critères de sélection, les deux rendez-vous pour les séances d'imagerie étaient fixés durant cette conversation téléphonique. Sur les 116 parents initialement intéressés à ce que leur enfant participe, 48 enfants ont été retenus pour prendre part au projet. Plusieurs enfants n'ont pas pu être sélectionnés pour différentes raisons : gaucher, trouble d'apprentissage (dyspraxie, TDAH, déficience intellectuelle, etc.), condition médicale empêchant la participation à une séance d'IRMf, crainte trop importante de l'enfant à participer, capacité à lire rapportée par les parents, trajectoire scolaire atypique (p. ex., retard ou avance dans le parcours scolaire), etc. Certains parents ont également décidé qu'ils ne souhaitaient plus que leur enfant participe au projet. La principale raison invoquée était le manque de temps pour accompagner leur enfant lors des séances de neuroimagerie. Dans plusieurs cas, il n'a simplement pas été possible de joindre les parents au téléphone.

La participation au projet de recherche était donc volontaire. Pour chacune des séances, une compensation monétaire de 20 \$ était offerte pour la participation au projet, ainsi qu'un montant forfaitaire de 20 \$ visant à compenser les frais associés au déplacement. Chaque enfant recevait également une image de son cerveau afin de le remercier pour son implication ainsi qu'un certificat de participation et un chandail à l'effigie du personnage de « Toc-Toc ».

Les 48 participants retenus étaient issus de 12 écoles dont 10 écoles publiques relevant de cinq commissions scolaires différentes : Commission scolaire de Montréal, Commission scolaire de Laval, Commission scolaire Marie-Victorin, Commission scolaire des affluents et Commission scolaire de la Rivière-du-Nord.

3.2.3 Formation des deux groupes expérimentaux

Les 48 participants retenus ont été répartis, par tirage au sort, en deux groupes de 24 participants. Ce nombre respecte les recommandations de statisticiens spécialistes de l'IRMf qui suggèrent qu'un nombre de 20 participants par groupe semble associé à une puissance statistique suffisante (Desmond et Glover, 2002; Murphy et Garavan, 2004). Le premier groupe a été associé à l'intervention phonologique et le deuxième groupe à l'intervention globale. Les variables du sexe et du milieu scolaire (école) ont toutefois été contrôlées de façon à ce qu'il y ait autant de filles que de garçons dans chaque groupe et afin de s'assurer que chaque école ne soit pas associée à un seul type d'intervention. Les participants ont donc été répartis de façon aléatoire dans chaque groupe à partir de deux bassins : filles et garçons, en alternant systématiquement les interventions phonologique et globale d'un participant à l'autre, pour chaque école. De plus, comme neuf intervenants associés à différentes écoles ont été responsables de mettre en place les interventions auprès des participants, la répartition a aussi été faite en s'assurant qu'un

intervenant ne puisse pas être associé à un seul type d'intervention. Cet aspect est détaillé davantage à la section 3.3.3.

Cette façon de procéder pour former les groupes a permis de répondre à deux préoccupations centrales. D'abord, nous souhaitons qu'il y ait une proportion égale de filles et de garçons dans chaque groupe de façon à avoir une représentation équitable de chaque sexe au sein du projet. Les résultats obtenus pourront ainsi s'appliquer autant aux filles qu'aux garçons. Sur le plan cérébral, de nombreuses études montrent que les différences individuelles dépassent les différences attribuables aux sexes (Vidal, 2005, 2012) et qu'il ne semble pas exister de différence significative en ce qui a trait aux aires du langage entre les hommes et les femmes (Allendorfer *et al.*, 2012). Contrairement aux facteurs de l'âge et possiblement de la latéralité, le fait d'inclure à la fois des participants garçons et filles avait donc une incidence négligeable sur la variabilité cérébrale de l'échantillon. Par ailleurs, il semble que le milieu socioéconomique d'un individu puisse avoir une incidence sur son activité cérébrale (D'Angiulli *et al.*, 2012), ce qui laisse entendre qu'il pourrait s'agir d'une variable confondante pour ce projet. Le fait qu'aucune des écoles ne soit associée à un seul type d'intervention a donc permis en partie de s'assurer que les différences d'activité cérébrale ne soient pas attribuables aux spécificités de l'école ainsi qu'au niveau socioéconomique. Ce contrôle demeure cependant imparfait puisque l'indice de défavorisation d'une école est calculé à partir de l'ensemble de la population des élèves de l'école et n'est donc pas nécessairement représentatif du milieu socioéconomique d'un élève, mais nous croyons que cette mesure de contrôle supplémentaire était suffisante compte tenu de la répartition aléatoire des participants dans les groupes.

Une autre limite importante concerne les pratiques éducatives en lecture qui auraient pu être mises en place par l'enseignant ou les parents en cours de projet et qui auraient pu influencer le développement d'habiletés de lecture chez les participants. Pour des

raisons de faisabilité et considérant le défi déjà important lié au recrutement des jeunes participants, il n'a pas été possible de contrôler pleinement cette variable et nous reconnaissons qu'il s'agit d'un biais possible à cette étude. Afin de limiter celui-ci, nous avons demandé explicitement aux enseignants ainsi qu'aux parents de ne pas mettre en place des interventions particulières en lecture durant la réalisation du projet de recherche, en d'autres mots de ne rien faire « de plus » ou « de spécial » en raison du projet. Nous avons aussi choisi de maximiser les interventions en les concentrant sur cinq semaines, de façon à limiter la durée du projet et à diminuer l'impact possible de pratiques supplémentaires qui auraient quand même pu être mises en place. Finalement, ni les enseignants ni les parents n'étaient au courant de la nature des interventions mises en place auprès de chacun des enfants. Ces interventions leur ont simplement été présentées comme étant des « jeux en lecture ». La seule façon de contrôler ce biais entièrement aurait été de sélectionner uniquement des classes de niveau préscolaire pour lesquelles l'enseignant ne mettait en place aucune intervention liée à la lecture. Or, les pratiques d'éveil à la lecture sont très courantes en classe préscolaire, qu'il s'agisse de conscience phonologique, de reconnaissance des lettres ou encore de reconnaissance de « mots-étiquettes » familiers et nous sommes d'avis que d'un point de vue éthique, exiger des enseignants qu'ils ne mettent rien en place auprès de leurs élèves n'aurait pas été bienveillant à l'égard de ces derniers. La même logique s'applique pour ce qui est des pratiques parentales. Nous avons donc préféré leur demander de ne rien faire « de plus » que ce qui était fait habituellement, en considérant que certains enseignants ou parents allaient peut-être faire quelques interventions davantage « phonologiques » ou d'autres davantage « globales ». Nous sommes d'avis que la répartition aléatoire des participants dans les groupes a pu contribuer à diminuer l'impact des pratiques des enseignants ou des parents. Malgré tout, nous sommes conscients que cet aspect demeure une limite de l'étude.

Les 48 participants sélectionnés ont tous pris part à la 1^{ère} rencontre visant à évaluer leurs habiletés initiales de lecture. À la suite de cette évaluation, deux participants ont dû être exclus du projet, car ils présentaient un niveau de lecture trop avancé (ils savaient déjà lire certains des mots associés aux interventions). De plus, malgré les nombreuses précautions mises en place, certains élèves n'ont pas pu poursuivre leur participation au projet à la suite de la 1^{ère} séance d'imagerie, et ce, pour différentes raisons : trois participants n'étaient pas en mesure de demeurer suffisamment immobile dans l'appareil d'IRMf, deux participants avaient peur de l'appareil ce qui a mené à annuler la séance et quatre participants ont eu des contraintes d'horaire qui les ont empêchés de mener à terme leur participation (oubli du rendez-vous, problème de santé du parent ou de l'enfant, etc.). Lorsqu'il s'agissait d'une contrainte d'horaire, il était toujours proposé au parent de reporter le rendez-vous, mais cela n'a pas toujours été possible compte tenu de la disponibilité de l'appareil d'imagerie et de l'horaire des parents. Au moment de mettre en place les interventions en lecture, l'échantillon était donc composé de 37 participants. Un diagramme présentant une synthèse de l'attrition expérimentale (c'est-à-dire la défection de plusieurs participants après qu'ils aient été répartis au sein des groupes expérimentaux) à chacune des étapes du projet est présenté à l'Annexe B. Le tableau 3.1 résume les principales caractéristiques de chacun des groupes de participants.

Tableau 3.1 Synthèse des caractéristiques des deux groupes de participants

Intervention phonologique ($n = 20$)	Intervention globale ($n = 17$)
Moyenne de 5,9 ans ($ET = 0,3$)	Moyenne de 5,9 ans ($ET = 0,3$)
10 filles et 10 garçons	8 filles et 9 garçons
Niveau préscolaire	Niveau préscolaire
Droitiers	Droitiers
Non-lecteurs	Non-lecteurs
Élèves issus des 12 écoles sélectionnées	Élèves issus des 12 écoles sélectionnées
Implication des 9 intervenants	Implication des 9 intervenants
Unité d'analyse du mot : correspondances graphèmes-phonèmes	Unité d'analyse du mot : forme entière du mot

Les deux groupes se distinguaient donc par le type d'intervention qui était mise en place et qui faisait converger l'attention du participant vers une unité d'analyse du mot différente.

Par ailleurs, bien qu'une répartition aléatoire des participants entre les groupes permette en théorie de présumer de l'équivalence des groupes et de les comparer, nous sommes d'avis que les deux groupes de ce projet comprenaient un nombre limité de participants et que la probabilité qu'ils demeurent différents malgré la répartition aléatoire était plus élevée. Nous avons donc souhaité ajouter un niveau de précaution supplémentaire en vérifiant *a posteriori* que ces derniers étaient effectivement équivalents au regard de plusieurs éléments pouvant influencer leur apprentissage de la lecture des mots.

D'abord, deux tests standardisés permettant d'évaluer le langage écrit ont été sélectionnés afin de vérifier le niveau de lecture des participants en prétest : le test de l'Alouette (Lefavrais, 2005) ainsi que le test de Lecture de mots en une minute (LUM)

faisant partie de l'Épreuve d'évaluation de la compétence en lecture (LMC-R, Khomsi, 1999). Ces tests ont été sélectionnés, car ils remplissent plusieurs critères de qualité psychométriques (Bertrand, Fluss, Billard et Ziegler, 2010). Le test LUM possède notamment une sensibilité importante pour discriminer les faibles lecteurs des bons lecteurs (Bertrand *et al.*, 2010). Ces deux tests ont permis de s'assurer que les participants sélectionnés ne savaient pas lire avant leur participation au projet. Pour être sélectionnés, les participants ne devaient pas être en mesure de lire le texte de l'Alouette, ni de lire les mots compris dans la liste du LUM. Une reconnaissance des lettres de l'alphabet était cependant acceptée. Puis, un test visant à vérifier spécifiquement si le participant était déjà capable de lire les mots associés à l'intervention a également été réalisé de manière à s'assurer que la capacité de l'élève à lire ces mots en posttest provienne vraiment de sa participation à l'une ou l'autre des interventions. Sur la base des résultats obtenus à ces tests, il a été nécessaire d'exclure deux participants, avant la mise en place des interventions, car ceux-ci avaient obtenu un score de lecture trop élevé à l'un des tests (les deux participants parvenaient déjà à lire certains des mots associés aux interventions).

La conscience phonologique ainsi que la capacité à reconnaître les lettres de l'alphabet, deux prérequis à la lecture, ont également été évaluées à l'aide des sous-tests de conscience phonologique (facilité à reconnaître le premier phonème) et de reconnaissance des lettres de l'alphabet de la batterie IDAPEL (Dufour-Martel, 2003; Dufour-Martel et Good, 2009). Cette batterie a été sélectionnée, car elle a été conçue pour le groupe d'âge des participants et parce qu'elle présente une fidélité et une validité prédictive intéressantes (Dufour-Martel et Desrochers, 2011; Dufour-Martel, Good, Dewey Latimer, 2012). Une évaluation des compétences associées à l'apprentissage de la lecture a aussi été réalisée à l'aide de trois épreuves de l'outil ODÉDYS-2 (Outil de dépistage de la dyslexie; Jacquier-Roux, Valdois, Zorman, Lequette et Pouget, 2005) : 1- l'épreuve de dénomination rapide (*Rapid Automated*

Naming), 2- l'épreuve d'empan de chiffres permettant d'évaluer les capacités de la mémoire verbale à court terme (empan endroit) ainsi que de la mémoire de travail (empan envers) et 3- l'épreuve d'attention visuelle. Ces épreuves ont été sélectionnées, car la vitesse de dénomination, les capacités mnésiques et les capacités visuo-attentionnelles sont trois compétences prédictives de l'apprentissage de la lecture (Sprenger-Charolles, 2003; Elbro, 2005). Les résultats obtenus à ces tests en prétest ont permis de valider, à la suite de la répartition aléatoire des participants dans les deux groupes, que les compétences de chacun des groupes étaient équivalentes, et qu'aucun des groupes ne présentait une plus ou moins grande réceptivité à l'apprentissage de la lecture avant la mise en place des interventions.

Le sous-test des matrices du WPPSI-IV (Échelle d'intelligence de Wechsler pour la période préscolaire et primaire; Wechsler, 2012) a aussi été utilisé afin d'obtenir une mesure stable dans le temps, c'est-à-dire l'obtention d'un score qui ne devrait pas varier à la suite des interventions. Si aucune différence significative n'est observée entre les deux moments de prise de mesure pour ce test, il s'agira d'un indicateur qu'il n'y a possiblement pas eu de changement sur le plan cognitif associé au développement de l'enfant sur une période de cinq semaines, autre que les changements associés aux habiletés de lecture et découlant des interventions mises en place. Bien entendu, cette indication demeure limitée, car le WPPSI-IV ne mesure que quelques dimensions de l'intelligence, mais ce choix représentait un compromis intéressant compte tenu du temps limité dont nous disposions pour rencontrer les élèves et administrer les tests.

Le tableau 3.2 présente une comparaison de la performance obtenue par chaque groupe pour chacun des tests. À la lecture de ce tableau, il est possible de constater qu'il n'existait aucune différence significative entre les groupes (test-t à 2 échantillons) à un seuil standard de $p < 0,05$, au regard des mesures ciblées. Cela indique donc que les deux groupes étaient effectivement équivalents pour ces mesures avant la mise en place

des interventions.

Tableau 3.2 Comparaison de la performance des groupes de l'échantillon initial pour chacun des tests standardisés

Tests standardisés	Groupe phono (<i>n</i> = 20)		Groupe global (<i>n</i> = 17)		Comparaison des groupes	
	Moy.	ET	Moy.	ET	Test-t	<i>p</i>
Lecture de mots en une minute (score sur 102)	0,95	1,67	0,88	2,12	0,11	0,92
Alouette (score sur 15)	7,45	3,38	6,53	2,83	0,90	0,37
Mots des interventions (score sur 20)	0,40	1,10	0,82	2,35	0,68	0,50
Reconnaissance des lettres (score sur 110)	16,25	12,98	15,70	7,21	0,15	0,88
Conscience phonologique (score sur 60)	18,05	11,22	15,00	9,06	0,91	0,37
Dénomination rapide (durée en secondes)	34,30	5,77	36,65	11,28	0,22	0,83
Empan mnésique						
Endroit (score sur 11)	4,75	1,80	4,18	1,33	1,11	0,28
Envers (score sur 11)	1,75	0,85	1,76	1,48	0,04	0,97
Attention visuelle (score sur 35)	22,15	4,04	21,59	5,10	0,37	0,72
WPPSI (score sur 26)	15,95	3,83	14,59	4,14	1,03	0,31

Néanmoins, comme cela sera détaillé dans les prochaines sections de cette thèse ainsi qu'à l'*Annexe B*, l'attrition expérimentale s'est poursuivie à différentes étapes subséquentes à la mise en place des interventions en lecture (ç.-à-d. lors de la 2^e séance d'imagerie ainsi que de l'analyse des données), et ce, malgré de nombreuses précautions. La tableau 3.3 présente donc une comparaison de la performance obtenue par chaque groupe de l'échantillon final, pour chacun des tests. Il est à noter que le groupe phonologique de l'échantillon final était composé de huit filles et de quatre

garçons (âge moyen de 6,0 ans, $ET = 0,3$), alors que le groupe global comprenait six filles et six garçons (âge moyen de 6,0 ans, $ET = 0,3$).

Tableau 3.3 Comparaison de la performance des groupes de l'échantillon final pour chacun des tests standardisés

Tests standardisés	Groupe phono ($n = 13$)		Groupe global ($n = 11$)		Comparaison des groupes	
	Moy.	ET	Moy.	ET	Test-t	p
Lecture de mots en une minute (score sur 102)	0,92	1,71	1,36	2,54	0,49	0,32
Alouette (score sur 15)	7,54	3,28	7,18	3,09	0,27	0,39
Mots des interventions (score sur 20)	0,62	1,33	1,27	2,87	0,70	0,25
Reconnaissance des lettres (score sur 110)	19,92	5,81	14,83	4,13	2,33	0,03*
Conscience phonologique (score sur 60)	20,02	4,08	16,14	3,96	2,35	0,03*
Dénomination rapide (durée en secondes)	33,54	5,27	37,54	13,71	0,91	0,19
Empan mnésique						
Endroit (score sur 11)	4,92	1,98	4,36	1,57	0,77	0,22
Envers (score sur 11)	1,69	0,75	1,45	1,12	0,60	0,28
Attention visuelle (score sur 35)	22,85	3,34	21,45	6,30	0,66	0,26
WPPSI (score sur 26)	16,46	4,33	15,27	4,38	0,67	0,26

* Significatif au seuil de $p < 0,05$.

À la lecture de ce tableau, on note que les deux groupes de l'échantillon final se distinguaient quant à leurs habiletés initiales au regard de la reconnaissance des lettres et de la conscience phonologique.

La passation des tests standardisés a été faite individuellement avec chaque participant

dans un intervalle maximum de 10 jours avant la première séance d'imagerie. Le WPPSI a pour sa part été administré de nouveau dans un intervalle de 10 jours après la dernière séance d'imagerie. Les résultats obtenus à ce test au posttest pour chacun des groupes de l'échantillon final indiquent qu'il n'y avait pas de différence significative entre les deux moments de collecte des données cérébrales (groupe phono : $t = 0,85$, $p = 0,41$; groupe global : $t = 1,53$, $p = 0,14$).

3.3 Interventions en lecture

Cette section vise à détailler différents aspects relatifs aux interventions en lecture. Une brève description de la nature de chaque intervention est d'abord présentée, incluant les consignes et le matériel utilisé. S'ensuivent les considérations relatives au choix des mots utilisés. Puis, la façon dont les interventions ont été mises en place est présentée.

3.3.1 Description des interventions

Les deux interventions en lecture mises en place se différenciaient quant à l'unité d'analyse sur laquelle l'attention des participants était dirigée. Comme cette recherche représente la toute première à comparer les effets de l'enseignement sur l'activité cérébrale de lecteurs novices, nous avons fait le choix méthodologique de comparer les deux interventions les plus éloignées possible, de façon à maximiser la possibilité d'observer une différence sur le plan cérébral : une **intervention phonologique** dirigeant l'attention du participant sur une unité d'analyse très fine (la correspondance graphème-phonème) comparativement à une **intervention globale** pour laquelle l'unité d'analyse était celle du mot entier. L'intention première n'était donc pas de représenter le plus fidèlement possible la pratique enseignante. Néanmoins, même si ces interventions sont rarement utilisées en classe de façon complètement exclusive, elles demeurent toutes deux présentes et utilisées dans les écoles et les manuels

scolaires (Deauviau, 2013; Laurin, 2010). Cette recherche constitue donc un point de départ à partir duquel il pourrait être possible de vérifier les effets d'autres interventions qui seraient moins contrastées.

De façon générale, les deux types d'intervention qui ont été mis en place dans le cadre de la recherche sont inspirés de celles réalisées par Brem *et al.* (2010) et Yoncheva *et al.* (2010, 2015), car elles dirigeaient l'attention des participants sur des unités d'analyse du mot différentes et elles visaient l'apprentissage d'un nombre restreint de mots (20 mots). Les séances d'intervention ont eu lieu quatre fois par semaine pendant cinq semaines. Concrètement, les interventions prenaient la forme de courtes périodes individuelles de 20 minutes avec chaque participant. Nous avons choisi de mener les interventions de manière individuelle plutôt qu'en groupe afin de maximiser l'attention du participant par le biais d'une relation d'enseignement d'un à un. De plus, chaque intervention visait une participation active de l'élève afin de maximiser son apprentissage dans le temps (c'est-à-dire maximiser l'écart cognitif sur le plan de l'apprentissage entre le prétest et le posttest). La personne qui réalisait les interventions se déplaçait à l'école du participant afin que toutes les interventions soient réalisées au sein du milieu scolaire.

Dans le cadre de l'intervention phonologique, l'attention du participant était dirigée explicitement vers les correspondances entre les graphèmes (symboles écrits) et les phonèmes (sons). De manière graduelle, l'intervenant introduisait à chaque période une ou deux nouvelles correspondances (pour un total de 19) et amenait l'enfant à lire un ou deux mots comprenant ces correspondances ainsi que d'autres vues lors des périodes précédentes. Dans le cadre de l'intervention globale, l'attention du participant était explicitement dirigée vers la forme entière du mot et ses caractéristiques visuelles. À chaque période, de nouveaux mots étaient introduits et le participant était amené à identifier les caractéristiques liées à la forme et à l'apparence visuelle du mot entier

(c'est-à-dire à le reconnaître comme s'il s'agissait d'une image). Aucune référence aux lettres et aux sons n'était faite dans le cadre de l'intervention B.

Pour les deux interventions, le matériel utilisé était constitué de cartes que l'élève pouvait manipuler. Pour l'intervention phonologique, deux types de cartes étaient utilisées : 1- des cartes représentant des lettres qui étaient vues d'abord de façon isolée, puis qui étaient agencées pour former des mots et 2- des cartes sur lesquelles chacun des mots de l'intervention était écrit, les lettres de ces mots étant séparées par des lignes pointillées (voir exemple à la figure 3.2). Pour l'intervention globale, les deux types de cartes consistaient en 1- des cartes sur lesquelles chaque mot était écrit, le contour du mot étant tracé de façon à mettre en évidence sa forme entière (à la manière de mots-étiquettes) et 2- des cartes sur lesquelles seulement le contour de chacun des mots apparaissait (voir exemple à la figure 3.3). Le matériel a donc été conçu de façon à ce que l'attention des élèves de chacun des groupes soit visuellement dirigée vers des unités d'analyse du mot différentes.



Figure 3.2 Exemple du matériel utilisé dans le cadre de l'intervention phonologique (unité d'analyse des correspondances graphèmes-phonèmes). A. Cartes sur lesquelles figurent les lettres isolées. B. Cartes sur lesquelles figurent chacun des mots, les lettres étant séparées par des lignes pointillées.



Figure 3.3 Exemple du matériel utilisé dans le cadre de l'intervention globale (unité d'analyse du mot entier). A. Cartes sur lesquelles figurent chacun des mots, le contour

de ces derniers étant tracé. B. Cartes sur lesquelles figure uniquement le contour de chacun des mots.

Les consignes données par les intervenants avaient aussi pour objectif de diriger explicitement l'attention de l'élève vers des unités d'analyse du mot différentes. Les figures 3.4 et 3.5 présentent un extrait du scénario mis en œuvre par tous les intervenants pour chacune des deux interventions. Le mot « papa » correspondait au premier mot enseigné.

1. Montrer la carte sur laquelle figure la nouvelle lettre (**a**) et demander à l'enfant s'il connaît le son que fait cette lettre.
 2. « Connais-tu le son de cette lettre? » (Cette lettre fait le son « aaaaa »)
 3. Faire la même chose avec la lettre **p**.
 4. Répéter les deux sons. Encourager l'enfant : « Oui, bravo, tu es très bon! »
 5. Indiquer à l'enfant : « Tu dois bien te concentrer sur le son de chaque lettre ».
 6. Poursuivre en lui demandant : « Maintenant, sais-tu ce que l'on entend si l'on colle les sons: **p + a = pa** » (aider l'enfant s'il n'y parvient pas : ppp-aaa = pa)
 7. Lui demander d'essayer de former le mot papa avec les lettres : **p-a-p-a**. L'aider au besoin en faisant les sons avec lui.
 8. Lui demander de lire le mot qu'il a formé en se concentrant bien sur le son des lettres (papa).
 9. S'il reste du temps, répéter les étapes 6 à 8.
 10. Féliciter de nouveau l'enfant à la fin de la période.
- La période suivante débute par un rappel des sons associés aux lettres vues à la période précédente : les lettres a et p. Puis, l'élève est invité à lire le mot papa en utilisant la carte sur laquelle le mot figure avec les lignes pointillées.

Figure 3.4 Extrait du scénario relatif à l'intervention phonologique pour le mot « papa ».

1. Montrer la carte sur laquelle figure uniquement la forme du mot « **papa** », c'est-à-dire son contour, et dire à l'enfant qu'il s'agit de la forme du mot « **papa** ».
2. Puis, montrer à l'enfant la carte sur laquelle figure le mot « **papa** » dont le contour est tracé et dire à l'enfant : « Tu dois bien te concentrer sur la forme du mot. Tu dois te souvenir de ce mot. Regarde bien sa forme et prend une photo dans ta tête : c'est papa » (lui faire répéter le mot à voix haute).
3. Lui parler de la forme du mot sans mettre l'accent sur les éléments qui composent le mot en utilisant des termes comme : cette lettre, le p, la troisième lettre, etc. Dire plutôt : « Au début du mot ça descend, ici c'est plus petit, puis ça redescend ».
4. Lui faire reconnaître le mot de nouveau et le féliciter: « Oui, bravo, tu es très bon! ».
5. Lui faire comparer la forme du mot à deux autres formes et lui demander ce qui est différent.
6. Lui faire tracer le contour du mot avec son doigt en décrivant la forme.
7. Lui montrer chacune des trois formes en lui demandant s'il s'agit du mot « **papa** ».
8. Lui présenter de nouveau le carton et lui demander de lire le mot « **papa** » en se concentrant bien sur la forme du mot.
9. S'il reste du temps, répéter les étapes 7 à 8.
10. Féliciter de nouveau l'enfant à la fin de la période.

La période suivante débute par un rappel de la forme du mot vu à la séance précédente (papa) : d'abord le contour seulement, puis le mot dont le contour est tracé. L'enfant doit dire de quel mot il s'agit.

Figure 3.5 Extrait du scénario relatif à l'intervention globale pour le mot « papa ».

L'organisation des interventions phonologique et globale comprenait plusieurs temps de révision : chaque période commençait par une brève révision de la période précédente. Un jeu de révision informatisé était également réalisé à la fin de chaque semaine (après chaque bloc de quatre périodes). Ce jeu exigeait que le participant lise sur un écran d'ordinateur chacun des mots vus durant la semaine et sélectionne parmi quatre images celle à laquelle correspondait le mot écrit. Une rétroaction était fournie de façon à ce que l'élève sache si sa réponse était correcte ou non. Le jeu se poursuivait jusqu'à ce que l'élève ait réussi à faire le bon appariement pour tous les mots.

Par ailleurs, une révision des deux premières semaines d'intervention était aussi faite au début de la 3^e semaine ainsi qu'une révision des semaines 3 et 4 au début de la 5^e semaine. Finalement, une révision générale avait lieu à la dernière période d'intervention (période 4 de la 5^e semaine). Ces moments de jeu hebdomadaire et de révision avaient pour objectif de maximiser l'apprentissage dans le temps ainsi que la rétention de ce qui avait été enseigné pour les deux interventions (Hattie, 2013) en mettant en pratique les principes largement documentés d'espacement (*spacing effect*,

Kornell, 2009; Kang, Lindsey, Mozer et Pashler, 2014) et de test (*retrieval practice*, Zaromb et Roediger, 2010). Plusieurs critères ont donc été maintenus constants entre les deux interventions de façon à s'assurer que des variables potentiellement confondantes n'aient pas un effet significatif sur l'activité cérébrale et que les interventions soient les plus équivalentes possible. Ces critères sont synthétisés au tableau 3.4.

Tableau 3.4 Synthèse des critères maintenus constants entre les deux interventions

Critères	Description
Choix des mots entraînés	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Les mêmes mots sont enseignés (<i>voir Annexe C</i>). ▪ Nombre total de 20 mots.
Nature des interventions	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Interventions individuelles. ▪ Participation active de l'élève. ▪ Utilisation d'un matériel d'apparence similaire (<i>voir Figures 3.2 et 3.3</i>).
Lieu des interventions	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Milieu scolaire de l'élève.
Fréquence et durée des interventions	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Fréquence : 4 périodes de 20 minutes par semaine. ▪ Durée : 5 semaines, soit 6,7 heures d'entraînement.
Organisation et structure des interventions	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Les mots sont vus dans le même ordre et aux mêmes périodes. ▪ Nombre équivalent de moments de révision.

Afin d'avoir une vision globale de la façon dont les interventions ont été mises en place, le déroulement temporel de celles-ci (répartition du contenu dans le temps) est présenté à l'*Annexe D*.

3.3.2 Choix des mots utilisés dans les interventions

Les 20 mots qui ont été « entraînés » ont été sélectionnés à partir de plusieurs critères. D'abord, il s'agissait de mots connus du vocabulaire parlé des enfants du préscolaire et d'un niveau de complexité réaliste compte tenu de l'âge des participants. Tous les mots étaient composés de 3 à 6 lettres formant 1 ou 2 syllabes. Ces mots faisaient appel à un total de 19 graphèmes distincts et ne contenaient pas de graphèmes complexes (c'est-à-dire composés de plusieurs lettres) à l'exception des graphèmes « in » et « on ». Il s'agissait tous de mots réguliers dont la structure syllabique la plus fréquente était de type consonne-voyelle. Comme ces mots étaient réutilisés dans le cadre de la tâche cognitive en lecture lors de la séance d'imagerie, tous les mots sélectionnés devaient présenter la possibilité d'être représentés par une image simple et posséder une valence émotionnelle neutre (Kuchinke *et al.*, 2005). Les mots choisis étaient pour la plupart des noms communs représentant des objets (p. ex., vélo, banane, patate, jupe, etc.), mais comprenaient également 2 verbes d'action (lire et rire). La liste complète des mots qui ont été utilisés est présentée à l'*Annexe C*.

3.3.3 Mise en place des interventions

Pour faciliter la réalisation du projet d'un point de vue logistique, il était initialement prévu que les participants soient répartis en quatre cohortes de 12 élèves. Deux intervenants étaient associés à chacune des cohortes et prenaient en charge la mise en place des interventions auprès des élèves, à l'exception d'une cohorte pour laquelle trois intervenants ont été mobilisés. Chaque intervenant avait donc au départ la responsabilité de six élèves provenant d'une même école ou de deux écoles de la même région (sauf pour la cohorte comprenant trois intervenants, pour laquelle deux des intervenants étaient responsables de trois élèves chacun). Neuf intervenants ont donc pris part au projet. Ceux-ci détenaient tous une expérience d'enseignement (il s'agissait d'étudiants au baccalauréat en enseignement, d'étudiants aux cycles supérieurs en

éducation, ou d'auxiliaires de recherche) et se sentaient à l'aise de travailler avec des enfants d'âge préscolaire. Il a aussi été vérifié qu'aucun d'entre eux ne détenait une expertise spécifique en didactique de la lecture, car il était souhaité qu'ils soient les plus impartiaux possible au regard des interventions à mettre en place. Une expertise en didactique de la lecture aurait en effet pu augmenter la probabilité de détenir un *a priori* ou une préférence concernant l'une ou l'autre des interventions. L'organisation initiale des quatre cohortes est illustrée à la figure 3.6.

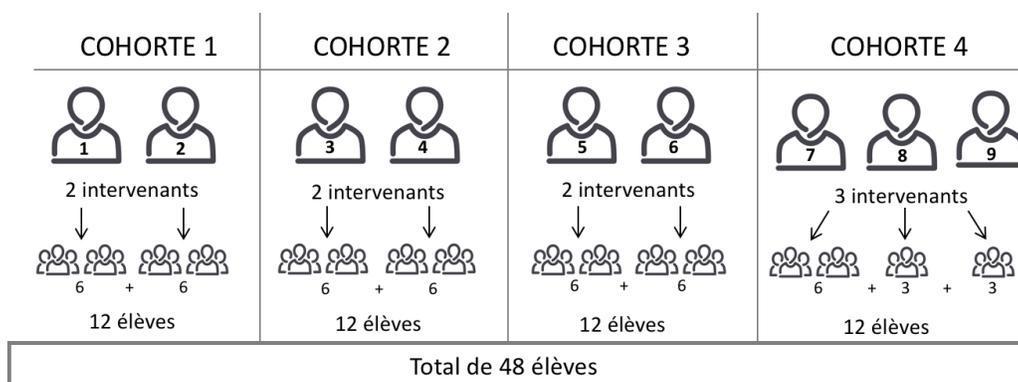


Figure 3.6 Organisation initiale des cohortes d'élèves pour la mise en place des interventions.

Tel que mentionné précédemment, cette organisation initiale a cependant été modifiée en raison de l'attrition expérimentale, ce qui fait en sorte que le nombre d'élèves dans chacune des cohortes a diminué, passant d'un total de 48 élèves à 37 (20 dans le groupe phonologique et 17 dans le groupe global). La défection de ces participants était associée à différentes raisons : incapacité de l'enfant à rester allongé dans l'appareil d'imagerie ou mouvement trop important dès la première séance (malgré les précautions prises, voir section 3.4.2), souhait de l'enfant ou du parent de ne plus participer par manque d'intérêt ou de temps, absence à la première séance d'imagerie (oubli, maladie, etc.) et incapacité à reporter le rendez-vous.

Les cohortes ont débuté le projet à une semaine d'intervalle en suivant exactement le même déroulement temporel (voir Figure 3.7). Une attention particulière a été portée afin de réduire au maximum l'écart entre le moment de l'évaluation des habiletés en lecture et le début de la collecte en neuroimagerie, ainsi qu'entre les séances d'imagerie et la mise en place des interventions en lecture. À cette fin, le moment d'évaluation des habiletés en lecture a eu lieu maximum 10 jours avant la première séance d'imagerie (IRM1). La première séance d'imagerie a quant à elle été réalisée dans un intervalle maximum de 10 jours avant la mise en place des interventions. Puis, les interventions ont été mises en place durant cinq semaines consécutives. La deuxième séance d'imagerie (IRM2) a été réalisée au maximum 12 jours après la fin des interventions. La participation d'un élève s'échelonnait donc sur environ huit semaines et la participation de l'ensemble des cohortes s'est échelonnée sur environ 11 semaines (entre le 22 février et le 9 mai 2016).

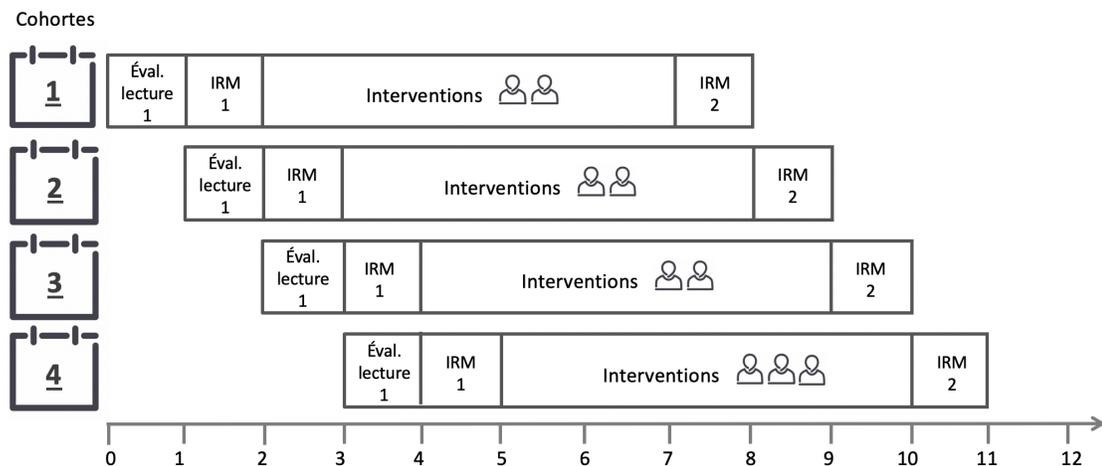


Figure 3.7 Déroulement temporel de la participation au projet pour chacune des cohortes.

Les neuf intervenants ont tous pris part à une formation d'une journée durant laquelle la procédure relative à chacune des interventions leur était présentée. Étant donné que

les participants étaient répartis aléatoirement entre les deux groupes (interventions phonologique et globale), tous les intervenants ont réalisé les deux types d'intervention. Cela a permis d'éviter qu'un type d'intervention soit associée à un nombre restreint d'intervenants. Toutefois, le risque associé à cette façon de procéder était que les intervenants aient une préférence pour l'une des deux interventions et la mettent en place avec une plus grande conviction. Le seul moyen de contrer complètement ce problème aurait été d'attribuer un seul type d'intervention à chaque intervenant (la moitié des intervenants auraient réalisé l'intervention phonologique et l'autre moitié auraient réalisé l'intervention globale). Néanmoins, cela aurait fait en sorte qu'il n'aurait pas été possible de répartir aléatoirement les participants entre les deux groupes. Chaque intervention aurait donc été associée à des écoles précises et donc aux spécificités et aux pratiques pédagogiques de ces écoles. Il semblait donc plus optimal de conserver la répartition aléatoire des participants. Cependant, pour diminuer les risques que les interventions puissent être biaisées par la préférence de l'intervenant pour l'une des deux interventions, deux stratégies ont été mises en place. La première stratégie consistait à scénariser les interventions de manière très précise et rigoureuse afin que les intervenants puissent suivre à la lettre le protocole qui leur était fourni. La deuxième stratégie a été mise en place dans le cadre de la rencontre de formation à laquelle ont participé tous les intervenants. Durant cette rencontre, aucun de ceux-ci n'a été mis au courant des hypothèses sous-tendant le projet de recherche. À aucun moment, il ne leur a été mentionné qu'une intervention pourrait potentiellement avoir un impact plus favorable que l'autre. Durant la rencontre de formation, les deux interventions leur ont uniquement été présentées comme étant possiblement associées à des activations cérébrales différentes (c'est-à-dire comme ayant des effets distincts sur le fonctionnement cérébral). Nous leur avons donc explicitement mentionné que les deux interventions devaient être réalisées avec la même rigueur et la même conviction, de façon à pouvoir distinguer au mieux les activations qui leur seraient associées par la suite. Cette stratégie s'apparente à une procédure en double-aveugle (*double-blind procedure*; Kirk, 2013) souvent utilisée dans le cadre de recherches médicales ou

pharmaceutiques dans laquelle ni les participants, ni les personnes qui font l'expérimentation ne connaissent les informations-clés ou les hypothèses du projet. D'ailleurs, aucun des intervenants n'était spécialisé en didactique des langues ou en enseignement de la lecture, ce qui aurait pu être à l'origine d'une préférence pour l'une ou l'autre des interventions. Tous ces éléments ont donc permis de contrôler le mieux possible les biais associés à l'intervenant.

Concrètement, les interventions prenaient place dans un endroit calme de l'école, comme un local de classe vide, favorisant ainsi un climat propice à la concentration de l'élève. Les interventions avaient lieu durant les heures de classe, à un moment ayant été convenu avec l'enseignant de façon à ce que l'élève ne manque pas de contenu important, ou bien sur l'heure du midi. Afin de maintenir la motivation de l'élève pour ces rencontres, un système de renforcement positif a été utilisé dans lequel l'élève pouvait apposer un autocollant dans son calendrier de rencontres. Cela lui permettait également de constater l'avancement de sa participation au projet.

3.4 Collecte des données

La collecte des données cérébrales représentait une étape cruciale du projet de recherche et constituait un défi important, notamment en raison de l'âge des participants. Cette étape a donc été longuement réfléchie de façon à identifier toutes les mesures pouvant faciliter la réalisation de la séance d'imagerie. Les principales étapes de la collecte sont ici présentées. Une importance particulière est accordée aux précautions supplémentaires qui ont été prises en regard de l'échantillon composé d'enfants.

3.4.1 Choix de la technique d'imagerie

Au niveau cérébral, la technologie de l'IRMf a été retenue, car elle est sécuritaire et permet d'identifier avec précision les régions cérébrales qui sont mobilisées lors de la réalisation d'une tâche cognitive (Huettel, Song et McCarthy, 2008; Poldrack, Mumford et Nichols, 2011). D'autres choix auraient pu être envisageables, tels que l'électroencéphalographie (EEG) ou la magnétoencéphalographie (MEG). Ces deux autres technologies présentent une très haute résolution temporelle, c'est-à-dire qu'elles permettent de suivre l'activité cérébrale à la milliseconde près. Cependant, l'EEG possède une résolution spatiale plus faible, ce qui veut dire qu'il est plus difficile de localiser avec précision où se situe l'activité cérébrale enregistrée dans le cerveau. La MEG possède une résolution spatiale qui demeure intéressante, mais somme toute moins précise que l'IRMf. Considérant que l'objectif de cette recherche est d'étudier l'impact de l'enseignement sur le fonctionnement cérébral, et plus précisément sur la spécialisation d'une région spécifique du cerveau, il semblait donc plus optimal d'opter pour une technologie présentant une meilleure résolution spatiale.

Le choix de l'IRMf se justifie donc principalement en regard des critères suivants :

- 1- Il s'agit d'une technologie non invasive (c'est-à-dire qui n'implique pas l'utilisation de marqueurs radioactifs et donc qui n'irradie pas le sujet).
- 2- Cette technologie présente une excellente résolution spatiale (de l'ordre du millimètre) et une bonne résolution temporelle (de l'ordre de la seconde). Elle permet donc d'obtenir des images de l'activité cérébrale bien définies et de suivre l'évolution de cette activité à travers le temps de façon suffisamment précise (Huettel *et al.*, 2008).
- 3- Selon les connaissances actuelles, l'IRMf n'est associée à aucun risque sur le plan médical, si le participant ne présente pas de contre-indication (Comité mixte d'éthique de la recherche du Regroupement Neuroimagerie/Québec).

L'IRMf est sensible à la concentration d'oxygène dans le sang (c'est-à-dire au ratio hémoglobine oxygénée/hémoglobine désoxygénée). Une fluctuation de cette concentration engendre une variation du signal capté qui indique une variation de l'activité cérébrale. On nomme ce principe l'effet *BOLD* (*Blood-oxygen-level-dependent*). Il est ainsi possible d'identifier, par le biais de cette variation du flux sanguin, les régions cérébrales qui s'activent lors de la réalisation d'une tâche cognitive précise.

Cependant, l'inconvénient le plus important associé à l'utilisation de l'IRMf demeure qu'elle est très sensible au mouvement (Poldrack *et al.*, 2011). Les mouvements du participant peuvent en effet avoir plusieurs conséquences indésirables tel que le déplacement de la position des régions activées, créant ainsi des artefacts qui augmentent le risque de faux positifs, c'est-à-dire le risque de considérer à tort certaines activations cérébrales (Anton, Dauchot et Pelegrini-Issac, 2006; Huettel *et al.*, 2008; Poldrack *et al.*, 2011). Plusieurs opérations sont possibles pour corriger le mouvement à la suite de l'acquisition des données, avant de réaliser les analyses statistiques (voir section 3.6). Le participant doit malgré tout rester le plus immobile possible dans l'appareil et répondre aux questions qui lui sont posées à l'aide d'une boîte de réponse (manette), ce qui constitue un défi important, particulièrement pour des enfants d'âge préscolaire (Byars *et al.*, 2002). En effet, même avec des sujets adultes très coopératifs, il existe toujours une probabilité pour que ceux-ci bougent un peu (en moyenne d'un millimètre, Friston, Williams, Howard, Frackowiak et Turner, 1996) durant l'acquisition des données. Comparativement aux adultes, les enfants présentent souvent des capacités attentionnelles plus limitées et sont tentés de bouger plus facilement et plus brusquement. Le bruit important qu'émet l'appareil d'IRM est aussi une contrainte qui peut être impressionnante pour de jeunes enfants. C'est la raison pour laquelle il est important de sensibiliser davantage le participant aux enjeux du mouvement et de

le préparer rigoureusement avant la séance d'IRM (Leroux, Lubin, Houdé et Lanoë, 2013).

Un protocole de préparation similaire à celui utilisé par Houdé et ses collaborateurs (2011) a été utilisé dans le cadre de ce projet. Les participants avaient d'abord eu connaissance de ce qu'était un appareil d'IRMf dans le cadre de l'atelier qui avait eu lieu dans leur classe. Pour bien leur faire comprendre à quoi ressemblait un appareil d'IRMf, un tunnel en tissus avait été utilisé et chaque élève avait pu s'allonger à l'intérieur, se pratiquer à rester le plus immobile possible, tout en répondant à une question simple à l'aide d'une fausse boîte de réponse (Figure 3.8-D, inspiré de Leroux *et al.*, 2013). Avant même la première séance d'imagerie, les participants avaient donc déjà eu un premier contact avec un environnement similaire à celui d'un appareil d'IRMf. Les autres mesures qui ont été prises afin de préparer les participants à la séance d'imagerie sont détaillées à la section suivante.

Dans le cadre de cette recherche, l'appareil d'imagerie cérébrale qui a été utilisé est celui de l'Unité de neuroimagerie fonctionnelle (UNF) du Centre de recherche de l'Institut universitaire de gériatrie de Montréal. Cet appareil est un Siemens TRIO TIM dont l'intensité du champ magnétique est de 3 teslas. L'antenne utilisée possède 32 canaux. Des images de l'activité cérébrale des élèves ont été collectées pendant que ces derniers réalisaient une tâche cognitive (détaillée à la section 3.4.3). Deux personnes étaient en charge de réaliser les séances d'imagerie. Ces personnes ne savaient pas à quelle intervention chaque participant était assigné et respectaient le même protocole pour collecter les données.

3.4.2 Déroulement temporel des séances d'IRMf

Le déroulement des séances d'IRMf suivait un protocole précis qui a été élaboré de

façon à ce que tous les participants passent par les mêmes étapes et reçoivent les mêmes consignes. La durée totale d'une rencontre était d'environ deux heures, incluant les étapes préparatoires à la séance d'IRMf.

Pour chacune des deux séances, lorsque les participants arrivaient à l'UNF accompagnés d'un parent, ils étaient accueillis par la personne en charge et invités à s'asseoir dans la salle d'attente. Afin que l'enfant se sente bien, la personne responsable de l'accueillir portait un chandail à l'effigie de « Toc-Toc » de façon à fournir un point de repère rassurant à l'enfant, dès le départ. Le déroulement de la séance d'IRMf était expliqué au parent et à l'enfant et le formulaire de consentement était revu avec le parent, puis signé. Afin de s'assurer que l'enfant donnait également son accord et avait envie de participer, nous lui demandions d'écrire symboliquement son prénom sur le formulaire. Le formulaire de dépistage était également relu et signé afin de s'assurer qu'aucun changement n'avait eu lieu au niveau de la condition médicale de l'enfant. Le technologue en fonction revoyait également ce formulaire avec le parent avant l'acquisition des données. Il était également important de vérifier, lors de cette étape, que le participant ne portait aucun élément contenant des parties métalliques.

Une fois cette étape complétée, le participant était invité à se déplacer vers la salle de simulation, laquelle contenait un simulateur de l'appareil d'IRMf. Afin que l'enfant se sente confortable et en confiance, plusieurs éléments de l'environnement du centre de recherche avaient été adaptés pour les enfants (Byars *et al.*, 2002; Holland *et al.*, 2001, 2007; Houdé *et al.*, 2011; Levesque *et al.*, 2004; Schmithorst, Holland et Plante, 2006; Yuan *et al.*, 2009). Des images ludiques à l'effigie de « Toc-Toc » avaient notamment été affichés dans les locaux du centre de recherche. Ces images illustraient les principales étapes à accomplir (1- salle de simulation, 2- salle d'IRMf). La personne en charge de la collecte faisait donc faire un bref tour des lieux à l'enfant en lui montrant les images, pour lui expliquer ce qui allait être fait et dans quel ordre. Il pouvait aussi répondre aux questions de l'enfant et le mettre en confiance.

Le simulateur est un appareil qui ressemble au véritable appareil d'IRMf, mais qui ne prend pas d'images du cerveau des participants. Dans un premier temps, les consignes liées à chacune des tâches étaient présentées au participant dans un ordre précis afin de s'assurer que tous les participants recevaient exactement les mêmes consignes. Ces consignes concernaient la façon de répondre en utilisant la boîte de réponse, les particularités des tâches, la façon dont allait se dérouler la séance d'IRMf. Dans un deuxième temps, le participant réalisait une séance d'entraînement à l'extérieur du simulateur qui reprenait une dizaine de stimuli similaires à ceux présentés dans la tâche réelle. La séance d'entraînement était réalisée sur un écran d'ordinateur et le participant répondait en utilisant la boîte de réponse. Ce premier entraînement avait pour objectif que le participant se familiarise avec la tâche cognitive (stimuli présentés, rythme de présentation, temps de réponse, périodes de repos, etc.) ainsi qu'avec l'utilisation de la boîte de réponse. Puis, le participant réalisait une deuxième séance d'entraînement en répondant de nouveau aux tâches, mais cette fois-ci, à l'intérieur du simulateur. Les objectifs de cet entraînement étaient : 1- de familiariser le participant avec l'environnement de l'IRMf, 2- de vérifier que le participant n'était pas claustrophobe et qu'il était capable de demeurer dans le tunnel de l'appareil malgré l'espace restreint et 3- que le participant était capable de répondre à la tâche cognitive en demeurant le plus immobile possible. Cette étape d'entraînement à l'intérieur du simulateur était particulièrement importante avec des participants enfants puisqu'elle leur permettait de comprendre de manière très concrète en quoi consisterait la vraie séance d'imagerie. Afin de rendre l'appareil moins intimidant, des autocollants portant sur le thème de l'espace avaient été apposés sur l'appareil (Leroux *et al.*, 2013) et la séance d'imagerie était de nouveau présentée à l'enfant comme un voyage dans l'espace : l'appareil étant comme un vaisseau spatial et l'enfant comme un astronaute ayant une mission à accomplir. Les bruits émis par l'appareil d'IRM étaient également présentés à l'enfant afin que ce dernier n'ait pas de surprise et qu'il comprenne que ceux-ci étaient normaux. Une rétroaction était donnée à l'enfant à la suite de sa pratique dans le simulateur afin de lui mentionner s'il avait bien accompli sa mission en réalisant la

tâche et en demeurant le plus immobile possible.

Une fois cette étape d'entraînement terminée, le participant était invité à se déplacer dans la salle d'IRMf (Figure 3.8-E). Avec l'aide d'un technologue et de la personne en charge de la collecte, le participant s'allongeait sur la table de l'appareil. Des écouteurs (Sensimetrics, modèle S14) étaient placés dans ses oreilles afin qu'il puisse entendre les sons pour l'une des tâches qu'il avait à réaliser. Un casque d'atténuation des bruits était aussi installé par-dessus les écouteurs. Le technologue s'assurait que la tête du participant était bien positionnée et des coussins étaient placés de chaque côté de sa tête afin de minimiser les risques de mouvements lors de l'acquisition des images.

Cette acquisition se déroulait en trois temps. D'abord, dans le but de localiser adéquatement les activations cérébrales, des images anatomiques (T1) du cerveau étaient acquises (séquence de type *multi-echo MPRAGE*) alors que le participant était au repos. L'acquisition de ces images anatomiques prenait environ 6 minutes. Durant cette séquence d'acquisition, on présentait au participant un court film d'animation dans lequel un personnage réalise un voyage dans l'espace. Cela avait pour objectif de placer l'enfant dans un contexte rassurant dès le début de la séance d'imagerie. Cela visait également à ce que l'enfant soit suffisamment attentif et bouge le moins possible. Comme il ne s'agissait pas à cette étape de prendre des images de l'activité du cerveau en lien avec une tâche, mais uniquement des images de l'anatomie du cerveau du participant, l'écoute d'un film n'était pas problématique.

À la suite de l'acquisition des images anatomiques, la tâche cognitive était réalisée par le participant (voir la description complète de la tâche à la section 3.4.3). Des images fonctionnelles (T2*) du cerveau du participant étaient acquises alors que ce dernier répondait à la tâche. Cette tâche, subdivisée en quatre séries équivalentes, durait au total environ 12 minutes. Puis, une pause de quelques minutes était prise de façon à ce

que le participant puisse bénéficier d'un temps de repos. Durant cette pause, l'expérimentateur pouvait interagir avec le participant en lui parlant via un micro afin de s'assurer que ce dernier se sentait bien et qu'il était suffisamment détendu. La durée totale de l'acquisition des données, incluant les temps de pause, était d'environ 20 minutes. Les paramètres d'acquisition des images fonctionnelles et anatomiques sont présentés à l'*Annexe E*.

Une fois la séance d'IRMf terminée, les participants étaient invités à aller se changer et étaient raccompagnés à la salle d'attente pour rejoindre leur parent. L'expérimentateur s'assurait que le participant se sentait bien et prenait en note ses commentaires, s'il y avait lieu. Puis, la date du rendez-vous pour la 2^e séance était fixée avec le parent. Cette deuxième séance se déroulait en tous points comme la première. À la suite de celle-ci, le participant était finalement remercié d'avoir participé à l'étude. Un chandail à l'effigie de « Toc-Toc » ainsi qu'un « diplôme du petit chercheur » (Figure 3.8-F) lui étaient remis et une photo de son cerveau lui était envoyée par courriel dans la semaine suivant l'expérimentation. Sur les 37 participants ayant complété la première séance d'imagerie, seuls 34 (18 du groupe phonologique et 16 du groupe global) ont pris part à la 2^e séance d'imagerie : deux participants n'ont pas été en mesure de compléter les interventions parce qu'ils se sont absentes du milieu scolaire à plusieurs reprises durant cette période et un participant ne s'est pas présenté à la 2^e séance d'imagerie.

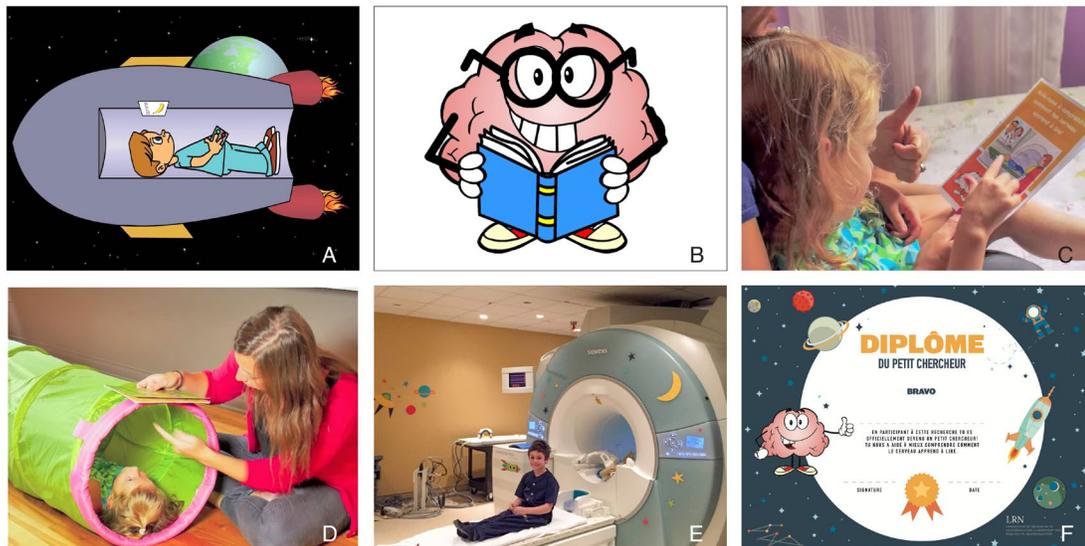


Figure 3.8 Images illustrant différentes étapes et éléments importants du projet. A. Une image tirée de la vidéo de présentation du projet qui représente l'analogie du voyage dans l'espace. B. La mascotte du cerveau (« Toc-Toc ») qui a servi de référent visuel tout au long du projet. C. Une participante et son parent lisant la brochure destinée aux enfants. D. La même participante s'exerçant à rester immobile dans un tunnel de tissu avec l'aide d'une chercheuse. E. Un participant qui est sur le point de participer à la séance d'IRMf. F. Le certificat de participation qui a été remis à chaque enfant à la fin du projet.

3.4.3 Tâche cognitive

La tâche cognitive utilisée dans ce projet a été construite de façon à respecter les nombreuses contraintes qu'impose l'utilisation de l'IRMf. Ces contraintes proviennent principalement : 1- du bruit qu'émet l'appareil, 2- de l'obligation pour les participants de demeurer immobiles (surtout au niveau de la tête) en répondant aux questions, 3- de la mince variation du signal mesuré, combinée à un faible rapport signal sur bruit et 4- du délai de la réponse hémodynamique (c'est-à-dire du délai entre l'activation des neurones et l'augmentation de la concentration d'oxyhémoglobine qui fait varier le signal mesuré en IRMf).

Le bruit important qu'émet l'appareil rend en effet difficile l'utilisation de stimuli auditifs (Amaro et Barker, 2006) et les recherches impliquant l'IRMf préconisent généralement l'utilisation de stimuli visuels. La tâche cognitive impliquait néanmoins l'utilisation de stimuli auditifs, mais ceux-ci consistaient en un seul mot qu'il était facile de bien entendre. Les stimuli visuels étaient présentés sur un écran et les participants pouvaient voir l'écran par le biais d'un miroir, placé devant eux, qui projetait l'image de cet écran.

Tel que discuté précédemment, lors d'une séance de neuroimagerie, les participants sont allongés dans l'appareil et ils doivent demeurer le plus immobiles possible durant l'acquisition des images (la tête devant demeurer complètement immobile), car même un mouvement de la tête de quelques millimètres peut avoir pour effet de nuire à la qualité des images collectées et parfois même de les rendre inutilisables. Pour éviter que les participants ne bougent la tête, il est préférable de ne pas leur demander de répondre oralement aux questions qui leur sont posées. Dans le cadre de cette étude, les participants répondaient à des questions à choix de réponse en appuyant manuellement sur les boutons d'une boîte de réponse (Modèle Lumina LP-400). La mince variation du signal mesurée combinée au faible rapport signal sur bruit représente une autre contrainte importante qui implique de présenter un nombre minimum de stimuli pour chaque condition à l'étude afin d'obtenir des différences qui sont statistiquement significatives. On estime généralement à 20 le nombre minimum de stimuli qui doivent être présentés (Poldrack *et al.*, 2011). Finalement, le délai de la réponse hémodynamique fait en sorte qu'il est nécessaire de déterminer une durée de présentation des stimuli et de pause suffisante. Ces dernières contraintes ont également été prises en considération dans l'élaboration de la tâche qui est détaillée ci-après.

Dans le cadre de cette tâche de lecture, il a été demandé aux participants de lire les vingt mots appris durant les interventions. L'objectif de cette tâche était d'observer les effets

de chaque intervention sur l'activité cérébrale engendrée durant la lecture. De plus, considérant les résultats obtenus par Yoncheva et son équipe (2010, voir section 2.2), vingt mots nouveaux qui ne faisaient pas partie des deux interventions ont également été intégrés à la tâche de lecture afin d'observer l'activité cérébrale associée à la lecture de nouveaux mots et la capacité de transfert pour chacune des interventions. Cette tâche était subdivisée en quatre séries équivalentes comprenant chacune 12 stimuli. Les 40 stimuli (20 mots entraînés et 20 mots nouveaux) étaient répartis dans chacune des séries de façon aléatoire, par tirage au sort. Pour chaque série, deux mots étaient répétés (un mot entraîné et un mot nouveau). L'appariement entre le mot répété et l'image n'était pas le même lors de la répétition. Cette répétition avait pour objectif de présenter le plus grand nombre de stimuli possible à l'intérieur du temps alloué à chaque série, sans avoir à enseigner plus de 20 mots dans les interventions. Le fait de présenter deux stimuli de plus par série a ainsi permis d'augmenter la quantité de données collectées pour chaque participant, contribuant ainsi ultimement à l'obtention d'une meilleure puissance statistique. Les mots répétés ont été tirés au sort dans la banque de mots de chaque série. Cette répétition nous est apparue comme étant le compromis le plus intéressant, bien qu'imparfait, afin de trouver un équilibre entre les contraintes pratiques liées à l'organisation des interventions et le souhait de maximiser la puissance statistique. Chaque série durait en moyenne 3 minutes et une pause de 2 minutes était réalisée entre chacune. Dans l'ensemble, la tâche durait donc environ 12 minutes. La liste complète des mots entraînés et des mots nouveaux ainsi que leur répartition dans chaque série est fournie à l'*Annexe F*. Le déroulement temporel de la tâche est quant à lui présenté à la figure 3.9.

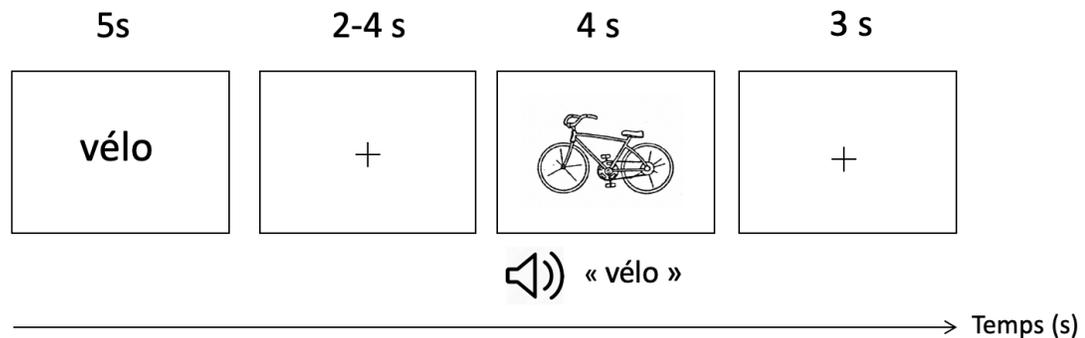


Figure 3.9 Déroulement temporel de la tâche d'appariement.

Un mot était d'abord présenté sur un écran pour une durée de 5 secondes. Une croix de fixation apparaissait ensuite pour une durée aléatoire variant entre 2 à 4 secondes. Puis, une image apparaissait et, de façon simultanée, le nom de cette image était prononcé. Cette variation aléatoire du temps de pause associé à la présentation de la croix de fixation, appelée *temporal jittering*, permettait de réduire les risques d'observer un chevauchement de la réponse hémodynamique entre les stimuli visuel et auditif (Murphy et Garavan, 2004), permettant ainsi de mieux distinguer la réponse hémodynamique (l'activité cérébrale) associée au moment de lecture du mot de la réponse associée à l'écoute du mot prononcé combinée à l'observation de l'image.

L'appariement mot-image pouvait être correct ou incorrect. La figure 3.9 illustre un appariement correct : l'image qui apparaît sur l'écran correspond au mot présenté juste avant (un vélo) et le participant entend au même moment le nom de l'image : « vélo ». Tant les mots entraînés que les mots nouveaux devaient être des mots « illustrables », c'est-à-dire qu'il devait s'agir de mots faisant référence à des choses concrètes pouvant facilement être représentées par une image. Après avoir regardé l'image et entendu le nom de l'image prononcé, le participant devait alors juger si l'appariement entre le mot lu et l'image de ce mot était correct ou incorrect (c'est-à-dire si l'image et le mot écrit représentaient la même chose) et donner sa réponse en appuyant sur l'un des deux

boutons d'une boîte de réponse. Entre chaque paire mot-image, une croix de fixation était présentée pour une durée de 3 secondes.

Cette organisation est typique d'un protocole qualifié d'événementiel (pour plus de détails, voir Amaro et Barker, 2005; Chee, Venkatraman, Westphal et Siong, 2003; Petersen et Dubis, 2011; Liu, 2012) dans lequel chaque événement (dans ce cas-ci, la présentation du mot ainsi que la présentation de l'image et du son) est suivi d'une période de repos de 2 à 3 secondes. Ce type de protocole a l'avantage de présenter une plus grande flexibilité quant aux conditions déterminées par la question de recherche (Amaro et Barker, 2005). Il s'agissait de la seule option pouvant être utilisée pour répondre à la question de recherche sous-tendant ce projet puisque une présentation en blocs n'aurait pas inclus un temps de pause suffisant entre la présentation du mot écrit et de l'image/son et n'aurait donc pas permis d'isoler l'activité cérébrale associée à la lecture du mot. Plusieurs aspects de la tâche ont été contrôlés, dont : 1- un nombre égal d'appariements de type correct et de type incorrect (3 appariements de chaque type/série) à la fois pour les mots entraînés et les mots nouveaux, 2- un même nombre de mots entraînés et de mots nouveaux (6 mots de chaque catégorie/série), 3- une apparence visuelle similaire pour toutes les images (dessins en noir et blanc présentant un niveau de détails similaire).

Par ailleurs, la sélection des mots nouveaux a également été contrôlée de façon à ce que la liste des 20 mots nouveaux soit équivalente à celle des mots entraînés en regard de plusieurs critères, notamment un nombre égal de mots de 3, 4, 5 et 6 lettres, un nombre égal de mots possédant une ou deux syllabes ainsi que le même nombre de mots de chaque catégorie lexicale (noms et verbes). De plus, la base de données *Manulex* a été choisie afin de contrôler encore plus rigoureusement la sélection des mots nouveaux, cette dernière fournissant la fréquence d'occurrence de mots calculée à partir d'un corpus de 54 manuels scolaires (1,9 millions de mots) pour différents niveaux scolaires, au primaire (Lété, Sprenger-Charolles et Colé, 2004). Pour ce projet, les manuels scolaires

de niveau CP (équivalent français des élèves de 6 ans du Québec) ont été sélectionnés, car ils correspondent à l'âge des participants de l'étude. Deux critères principaux ont été ciblés afin de s'assurer de l'équivalence des deux listes de mots : la fréquence des mots ainsi que leur consistance graphème-phonème (souvent désignée également sous le nom de transparence orthographique). Un test-t a révélé qu'il n'y avait aucune différence significative ($p = 0,531$) entre les moyennes (sur 100) des index de fréquence standard (IFS) des mots de chaque liste (mots entraînés : $M = 59,2$; $ET = 6,8$, mots nouveaux : $M = 60,2$; $ET = 4,7$) issus de la base de données *Manulex* (Lété *et al.*, 2004; Ortéga et Lété, 2010). Ces mesures IFS sont calculées selon une transformation logarithmique qui prend en considération la fréquence brute du mot dans le corpus de manuels utilisé ainsi qu'un indice de dispersion du mot parmi ces manuels. Un test-t a également révélé qu'il n'y avait aucune différence significative ($t(38) = 1,4$, $p = 0,15$) entre les moyennes (sur 100) des index de consistance « orthographe vers phonologie » pour la totalité du mot (COGPT) entre les mots entraînés ($M = 85,2$; $ET = 9,6$) et les mots nouveaux ($M = 88,7$; $ET = 6,9$). Ces index de COGPT ont été calculés à l'aide de la base de données *Manulex-infra* (Peereman, Lété et Sprenger-Charolles, 2007) qui prend en considération la fréquence avec laquelle une association graphème-phonème apparaît ainsi que la fréquence totale du graphème, quelle que soit sa prononciation. Le fait de s'assurer au mieux de l'équivalence des deux listes de mots était important afin de pouvoir comparer l'effet distinct des interventions sur chaque catégorie de mots en réduisant l'interférence possible d'une tierce variable.

L'activité cérébrale qui a été étudiée dans le cadre de la thèse est celle associée au moment où le participant a lu le mot (écran 1 de la figure 3.9). La réponse fournie par le participant au moment où il a regardé l'image et a entendu le son (écran 3 de la figure 3.9) a surtout servi d'indice que ce dernier avait bien lu le mot qui lui était présenté.

Il est à noter qu'en raison de leur jeune âge, certains participants ne sont pas parvenus à compléter toutes les séries de la tâche durant les séances d'imagerie : 91 % des participants (31 participants sur les 34 ayant réalisé les deux séances) ont complété l'ensemble des quatre séries en prétest et 85 % (29 participants sur 34) ont réalisé l'entièreté de la tâche en posttest. Pour les autres participants, il manquait le plus souvent une série, parfois deux, sur les quatre.

3.5 Analyse des données comportementales

Afin de répondre à la question de recherche, les données concernant la performance à la tâche d'appariement ont été analysées à l'aide du logiciel *Statistical Package for the Social Sciences (SPSS 24)* (IBM Corp, 2016). Une analyse de variance (ANOVA) à mesures répétées 2 X 2 (Temps : prétest/ posttest X Groupe : phonologique/global) ayant comme variable dépendante la performance à la tâche a été réalisée de façon à vérifier si des interventions différentes ont eu des effets différents sur l'apprentissage de la lecture de mots entre le prétest et le posttest. L'analyse permettra donc de dégager l'effet individuel et combiné des variables *groupe* et *temps* sur la performance à la tâche d'appariement. Compte tenu de la question de recherche, l'intérêt principal réside dans l'effet d'interaction entre ces deux variables afin d'identifier si les groupes présentent une différence quant à leur apprentissage entre les deux moments de mesure. Étant donné que notre question de recherche ne visait pas à comparer les deux types de mots, et que nous n'avons pas non plus d'hypothèses cérébrales spécifiquement liées aux types de mots, nous avons mené une ANOVA de façon distincte pour chaque type.

3.6 Analyse des données cérébrales

Les données cérébrales recueillies ont été analysées de façon à mettre en évidence les effets de chacune des interventions sur le fonctionnement cérébral et le recyclage

neuronal de la région occipito-temporale gauche (OTG). Le logiciel qui a été utilisé pour traiter les données cérébrales recueillies est *SPM8* développé par le *Wellcome Department of Imaging Neuroscience* et fonctionnant avec *MATLAB* (pour plus d'informations, voir Ashburner, 2012). Avant de procéder à l'analyse même des données cérébrales, plusieurs étapes de prétraitement étaient nécessaires. Ces étapes (correction du mouvement, normalisation et lissage) sont présentées dans la section qui suit.

3.6.1 Étapes de prétraitements

Les prétraitements correspondent à une suite de manipulations qui visent 1- à diminuer la quantité de bruit dans les données afin d'augmenter le rapport signal sur bruit et 2- à préparer les données pour les traitements statistiques subséquents. Dans un premier temps, les prétraitements sont destinés à corriger au mieux la variabilité des données qui n'est pas associée avec la tâche expérimentale d'intérêt, c'est-à-dire le bruit dans le signal. Dans un second temps, ces étapes permettent de s'assurer de la stabilité spatiale des mesures nécessaires aux comparaisons intra- et inter-individuelles.

Pour ce projet, un premier contrôle de la qualité des données brutes a été réalisé par le biais d'une inspection visuelle. Ce contrôle de la qualité a permis de réaliser que les images anatomiques (T1) de quatre sujets présentaient une qualité trop faible pour pouvoir être utilisées dans les analyses, soit en raison d'un mouvement trop important durant l'acquisition de l'image anatomique (image anatomique très floue ne permettant plus de délimiter les structures cérébrales), ou encore en raison d'un problème technique (image anatomique complètement noire). Pour ces quatre participants, l'image anatomique acquise durant l'autre séance de neuroimagerie (prétest ou posttest, selon) a donc été utilisée. Chacune des trois étapes de prétraitements réalisées sur les

données est détaillée dans les pages qui suivent : 1- correction du mouvement, 2- normalisation et 3- lissage.

3.6.1.1 Correction du mouvement

Les mouvements de la tête constituent la plus grande source de variance/bruit, (Huettel *et al.*, 2008) et peuvent avoir des effets importants sur la qualité des données d'imagerie qui sont collectées (Thacker, Burton, Lacey et Jackson, 1999). En effet, d'un participant à l'autre, le positionnement de la tête dans l'appareil d'IRMf peut varier légèrement. Il est également possible qu'un participant bouge un peu la tête durant l'acquisition des images entraînant alors un déplacement de la position des régions activées. Même si ces mouvements peuvent être minimes comparativement à la taille d'un voxel (Oakes *et al.*, 2005), ils peuvent être suffisants pour invalider l'hypothèse selon laquelle les variations significatives observées dans l'intensité du signal sont principalement dues à des changements physiologiques sur le plan cérébral (Friston *et al.*, 1996).

Ces différences doivent être corrigées de façon à ce qu'une région cérébrale demeure à la même position durant toute la période d'acquisition des images dans le système de coordonnées standard $[x y z]$ pour l'ensemble des volumes obtenus. Dans le cadre de cette recherche, l'algorithme qui a été utilisé pour réaliser la correction du mouvement de la tête est celui de *SPM8*, qui permet d'aligner par translation et rotation les images obtenues par rapport à une image de référence. Cette correction du mouvement a été faite selon la procédure standard « *spm_realign* » recommandée par le logiciel qui permet de calculer une image moyenne pour chaque série (Friston *et al.*, 1996). La première image de chaque série est ensuite réalignée à partir de l'image moyenne de chaque session calculée par *SPM* et les autres images de la série sont ensuite réalignées à partir de la première image.

Considérant que les participants de l'étude sont de jeunes enfants, nous avons constaté que ces derniers présentaient parfois une quantité de mouvement importante durant l'acquisition des données (en moyenne : translation de 1,8 mm et rotation de 1,7 degré pour l'ensemble des séries des deux groupes en prétest et en posttest). Il n'y avait cependant pas de différence significative entre la moyenne du mouvement de chacun des groupes, ni entre les deux moments de collecte. Afin de corriger les mouvements trop importants, une correction supplémentaire du mouvement a été réalisée à l'aide de l'outil *ArtRepair* pouvant être intégré à *SPM* (Mazaika, Whitfield-Gabrieli, Reiss et Glover, 2007). Cet outil a d'abord permis de détecter chacun des volumes cérébraux pour lesquels un participant présentait un mouvement supérieur à une translation de 2 mm et à une rotation de 1 degré (seuils suggérés par *ArtRepair*). Puis, une correction permettait de remplacer ces volumes par le biais d'une interpolation réalisée à partir des volumes voisins (précédant et suivant les volumes à corriger). La procédure suivie est inspirée de celle détaillée dans la recherche de Monzalvo et de ses collaborateurs (2012). Cette correction supplémentaire du mouvement a dû être réalisée pour 30 participants, parfois de façon minimale, mais parfois de façon plus importante. Afin de respecter les recommandations des concepteurs d'*ArtRepair*, un seuil de 20 % des volumes d'une série a été fixé comme correction maximale : les séries pour lesquelles ce pourcentage était atteint ou dépassé ont donc été complètement retirées des analyses subséquentes. Cela a été le cas pour un total de 25 séries (prétest et posttest confondus) et a mené à l'exclusion de quatre participants du groupe phonologique et cinq participants du groupe global (car cela faisait en sorte qu'il leur manquait désormais toutes les séries du prétest ou du posttest).

3.6.1.2 Normalisation

Comme l'objectif de cette recherche implique de devoir faire des comparaisons de groupes, il était également important que les images cérébrales des participants d'un même groupe puissent être combinées entre elles au sein d'un espace commun, standard

et en trois dimensions. En effet, d'un participant à l'autre, certaines différences de morphologie cérébrale peuvent être constatées, notamment au niveau de la taille ou de la forme du cerveau. Étant donné que l'on souhaite étudier des régions cérébrales précises, ces différences peuvent avoir une incidence lors de l'analyse des données, surtout lorsque l'on souhaite comparer l'activité cérébrale de plusieurs sujets ou en faire une moyenne. Le processus de normalisation permet donc de localiser les régions cérébrales de chaque individu sur un cerveau de référence, à l'aide des coordonnées spatiales de ses voxels. Pour ce faire, *SPM* identifie et délimite les contours du cerveau du participant et normalise l'image de ce dernier afin qu'il devienne similaire au cerveau de référence. Dans le cadre de cette recherche, les données ont été normalisées en utilisant la méthode de la segmentation (Ashburner et Friston, 2005) implantée dans *SPM8*. Étant donné l'âge des participants, nous avons utilisé un modèle de cerveau pédiatrique correspondant à l'âge des participants à l'étude comme image de référence. En effet, en fonction de leur âge, il existe des différences anatomiques parfois considérables entre le cerveau des enfants et celui des adultes (Caviness, Kennedy, Richelme, Rademacher et Filipek, 1996; Fonov *et al.*, 2011; Sanchez, Richards et Almlí, 2012). Le modèle que nous avons utilisé a été créé à l'aide de l'outil *Template-o-matic* (*TOM*, Wilke, Holland, Altaye et Gaser, 2008). Cet outil fonctionne à partir d'une base de données contenant 404 images anatomiques de cerveau d'enfants âgés de 5 à 18 ans. Il permet de créer un modèle de cerveau moyen correspondant à la population d'une étude en précisant l'âge et le genre de chacun des sujets inclus dans les analyses. L'outil crée alors un modèle qui correspond à cette population. Il s'agit de la procédure qui a été employée dans le cadre de ce projet. Une autre alternative aurait pu être de créer un modèle à même les images anatomiques des participants du projet (par exemple, à l'aide de l'outil *DARTEL*, Ashburner, 2007). Cela aurait présenté l'avantage de créer un modèle encore plus près et possiblement encore plus représentatif des participants. Cependant, compte tenu du fait que plusieurs des participants avaient bougé durant l'acquisition de l'image anatomique, la qualité de ces images n'était pas toujours optimale. Il est donc recommandé dans cette situation de procéder à la création du

modèle à l'aide de l'outil *TOM*. Il importe de mentionner que pour un participant du groupe phonologique, un problème technique est survenu durant l'étape de la normalisation (obtention d'une image d'apparence écrasée et déformée) et, malgré des démarches menées auprès de *SPM* ainsi que de collaborateurs externes, nous ne sommes pas parvenus à le résoudre. L'hypothèse qui apparaît la plus probable pour expliquer ce problème de normalisation serait liée à un mouvement trop important du participant (nous avons en effet observé un mouvement s'étalant sur plusieurs volumes) que les deux procédures de correction du mouvement ne seraient pas parvenues à corriger suffisamment. Ce participant a donc dû être exclu des analyses subséquentes.

3.6.1.3 Lissage

Le processus de lissage constitue une étape importante, car il permet d'améliorer le rapport signal sur bruit. Ce prétraitement permet de répartir le signal ou l'activité d'un voxel du cerveau à ses voxels voisins. Plus le voxel voisin est proche, plus celui-ci « reçoit » du signal. Un voxel qui ne serait pas ou peu activé, mais qui serait situé dans une région cérébrale où tous les voxels voisins sont fortement activés deviendrait lui aussi plus activé après le lissage. À l'inverse, un voxel fortement activé, mais situé dans une région où aucun voxel voisin n'est très activé détiendrait un signal moins élevé à la suite du lissage. L'activité de certains voxels peut donc être renforcée ou réduite, selon l'activation des voxels environnants (Ward, 2010). Cela permet ainsi de réduire les risques de considérer des artefacts comme étant des régions significativement activées alors qu'il ne s'agit en fait que de bruit. De plus, le lissage est particulièrement utile lorsque l'on souhaite comparer les activations cérébrales de plusieurs individus, car il facilite la détection de régions cérébrales qui sont activées chez plusieurs sujets. Il peut également améliorer la validité des analyses statistiques subséquentes (Huettel, Song et McCarthy, 2008). Généralement, les études en IRMf utilisent un filtre gaussien allant de 6 mm à 10 mm FWHM, ce qui correspond environ à la taille de 2 à 3 voxels

(Huettel *et al.*, 2008), la taille moyenne d'un voxel étant de 3 à 4 mm (Anton *et al.*, 2006).

Dans le cadre de cette recherche, nous avons réalisé un lissage via un filtre gaussien d'une largeur de 6 mm, à la moitié de la hauteur maximale (*full-width-half-maximum*). La largeur du filtre fait référence à la distance jusqu'à laquelle ce dernier fait effet.

Une fois toutes ces étapes de prétraitement réalisées, les images fonctionnelles et anatomiques de chaque série, pour chaque participant, sont corrigées. Le traitement statistique des données peut alors avoir lieu. Au total, les données cérébrales de 13 participants du groupe phonologique et de 11 participants du groupe global ont été analysées.

3.6.2 Traitement statistique des données

La présente recherche vise à vérifier si la variable de l'enseignement (le type d'intervention mise en place) peut influencer le fonctionnement cérébral, dans le contexte d'un apprentissage nécessitant du recyclage neuronal (la lecture). Bien qu'il ne soit pas possible de généraliser les résultats obtenus auprès de nos participants à une population d'élèves de niveau préscolaire non lecteurs, compte tenu que l'échantillon n'a pas été constitué de façon aléatoire, nous souhaitons tout de même pouvoir discuter des résultats en comparant les deux types d'intervention. Pour ce faire, il est donc nécessaire de conduire des analyses de groupes, dites de second niveau, reposant sur les cartes statistiques de l'activité cérébrale (contrastes) de chaque participant obtenues lors des analyses de 1^{er} niveau. Les paragraphes qui suivent abordent plus en détail les étapes de ce processus d'analyse.

L'utilisation de l'IRMf permet d'étudier l'activation des voxels en fonction du temps afin de détecter une corrélation entre les variations du signal mesuré (signal *BOLD*, *Blood-oxygen level dependant*) et les conditions expérimentales de la tâche (Poldrack *et al.*, 2011). Des analyses sont donc appliquées à chaque voxel du cerveau de façon indépendante, en se basant sur des hypothèses *a priori* quant à la forme du signal mesuré. Ce type d'analyse est qualifié d'univarié : le signal *BOLD* (en d'autres mots, l'activité cérébrale) est la variable dépendante et les différents facteurs de l'expérimentation constituent les variables indépendantes. Le modèle linéaire général représente la technique univariée la plus répandue en IRMf (Smith, 2004) et il s'agit du modèle utilisé dans le cadre de cette recherche.

L'utilisation de cette technique univariée nécessite d'abord de spécifier le modèle en définissant les régresseurs expérimentaux et les régresseurs de nuisance qui, une fois intégrés, constituent une première partie de la matrice. Cette matrice de conception (*design matrix*) comprend toute l'information que l'on a *a priori* sur l'expérience et que l'on introduit dans le modèle linéaire général pour expliquer les données collectées.

Dans ce projet, les régresseurs d'intérêt sont les différentes conditions d'intérêt définies dans la tâche cognitive. Les régresseurs de nuisance sont quant à eux liés aux conditions qui n'étaient pas d'intérêt, à la dérive temporelle du signal de l'appareil d'IRMf ainsi qu'aux paramètres du mouvement. La fonction de base qui a été choisie pour spécifier le modèle est la fonction canonique de la réponse hémodynamique (HRF) à laquelle nous avons ajouté la dérivée temporelle de la HRF, ce qui permet de modéliser de légers décalages du pic de réponse de la HRF (Lindquist, Loh, Atlas et Wager, 2009; Zhang, Shen et Li, 2016). Le modèle linéaire général postule qu'il est possible d'estimer ou de prédire la valeur des données observées en combinant, de façon linéaire, plusieurs facteurs ou variables explicatives (qui détiennent différentes pondérations) ainsi qu'une certaine valeur d'erreur. La pondération de ces facteurs indique dans quelle mesure

ceux-ci contribuent à l'obtention des données. Ce modèle est généralement représenté par l'équation suivante (1) :

$$y = \beta_0 + \beta_1\chi_1 + \beta_2\chi_2 + \dots + \beta_n\chi_n + \varepsilon \quad (1)$$

Dans cette formule, y représente les données expérimentales qui sont observées, χ représente un facteur, β constitue la pondération de ce facteur et ε symbolise l'erreur (c'est-à-dire la variabilité des données que le modèle ne permet pas d'expliquer).

La figure 3.10 présente une synthèse des principales étapes de l'analyse des données cérébrales qui a été réalisée dans le cadre de ce projet de recherche. Après avoir réalisé l'ensemble des prétraitements pour chacune des séries de chaque tâche cognitive, pour tous les participants (voir l'étape 1 de la figure 3.10), nous avons conduit des analyses de premier niveau sur la base du modèle linéaire général afin de comparer entre elles les parts de variation du signal induites par les différentes conditions d'intérêt décrites dans le modèle (Anton *et al.*, 2006). Les principales conditions d'intérêt de la tâche de lecture étaient les suivantes : 1- mots entraînés (ME), 2- mots nouveaux (MN), qui correspondaient au moment où les participants lisaient chacun des mots associés à ces deux catégories, en prétest et en posttest. Il est à noter que les moments où les participants regardaient l'image et entendaient le son, puis fournissaient leur réponse, ont été définis comme un événement distinct qui a été intégré au modèle comme régresseur sans intérêt.

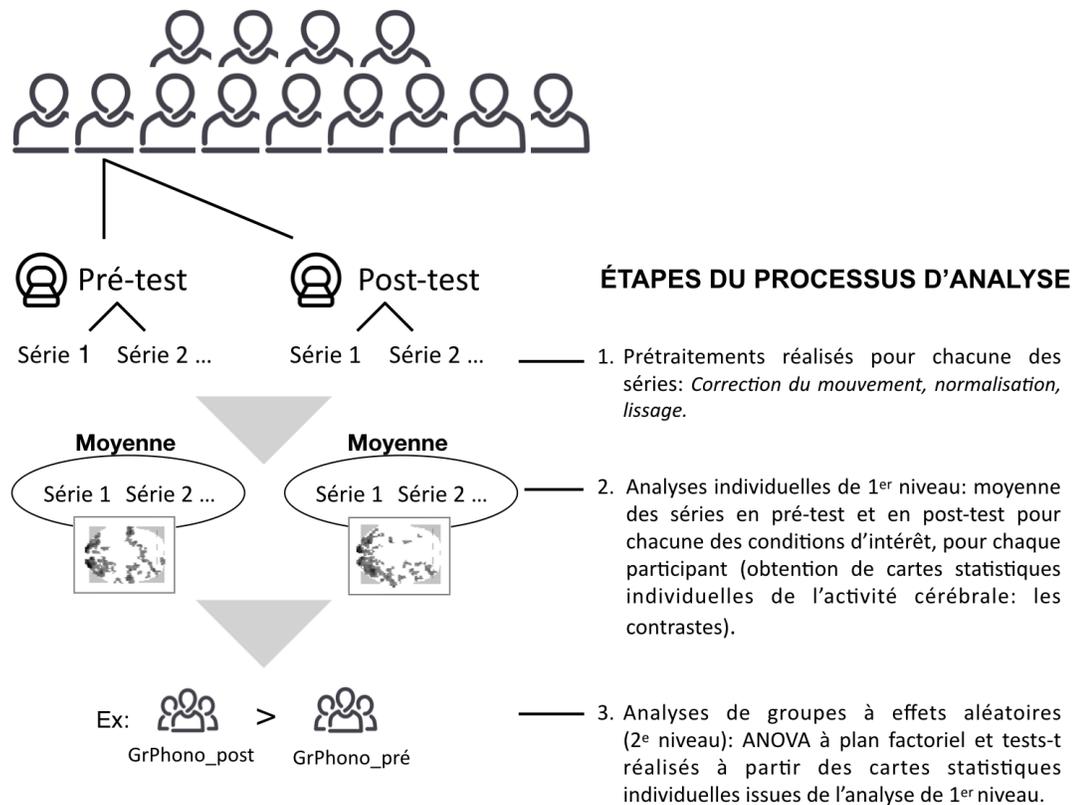


Figure 3.10 Synthèse des principales étapes du processus d'analyse des données cérébrales : prétraitements, analyses de 1^{er} niveau (effets fixes), analyses de 2^e niveau (effets aléatoires).

Les analyses de 1^{er} niveau sont des analyses à effet fixe qui tiennent compte uniquement de la variabilité intra-individuelle (Huettel *et al.*, 2008). Ces analyses ont conduit, dans un premier temps, à l'obtention d'une carte statistique moyenne de l'activité cérébrale (contraste) pour chacune des séries de chaque participant, en prétest et en posttest. Les contrastes représentent la moyenne des variations de signal dans chaque voxel pour l'une ou l'autre des conditions expérimentales de la tâche. Il y a donc autant de cartes de contraste que de conditions. Dans un deuxième temps, les analyses ont permis d'attribuer un poids à chaque série et d'obtenir l'activité moyenne de chaque sujet pour chacune des conditions, toutes séries confondues (voir l'étape 2

de la figure 3.10). Dans ce projet, l'option *Scale* de *SPM8* a été utilisée durant le moyennage de l'ensemble des séries de façon à ce que la carte statistique moyenne pour le prétest et pour le posttest soit pondérée en fonction du nombre de séries complétées pour chaque participant (le nombre de séries de chaque participant était en effet variable puisque certaines séries n'ont pas été complétées ou ont dû être supprimées en raison d'un mouvement trop important).

À la suite de ces analyses de 1^{er} niveau, nous avons ensuite réalisé des analyses de groupes (2^e niveau) par le biais d'analyses à effets aléatoires (voir l'étape 3 de la figure 3.10). Ce type d'analyse prend en compte la variabilité inter-individuelle en plus de la variabilité intra-individuelle (Poldrack *et al.*, 2011). Il s'agit d'une analyse adaptée à la comparaison de groupes de petite taille, entre autres parce qu'elle assume que des différences individuelles peuvent exister en plus de l'effet des facteurs à l'étude (Huettel *et al.*, 2008). Pour qu'une différence significative soit observée, il est essentiel qu'un grand nombre de sujets aient réagi significativement aux stimuli. Ce type d'analyse permet de réaliser des comparaisons de groupe à l'aide de tests statistiques (p. ex., test-t, ANOVA, etc.). Le choix des tests statistiques qui ont été réalisés dans le cadre de ce projet est justifié et détaillé à la section qui suit.

3.6.2.1 Tests statistiques utilisés

Afin de déterminer et de comparer comment l'activité cérébrale de deux groupes de participants (phono et global) varie en prétest et en posttest pour les différentes conditions d'intérêt de la tâche, nous avons d'abord privilégié l'utilisation d'une ANOVA à plan factoriel comprenant un facteur intra-sujet à deux niveaux (Temps : prétest et posttest) et un facteur inter-sujet à 2 niveaux (Groupe : phono et global). Afin de répondre à notre question de recherche, nous avons voulu mesurer les effets de l'interaction de ces facteurs sur la variable dépendante (VD), c'est-à-dire l'activité

cérébrale (signal *BOLD*), par le biais d'une seule analyse. Considérant la petite taille de notre échantillon et le caractère exploratoire du projet de recherche, nous avons choisi de mener une ANOVA pour les mots entraînés (ME) et les mots nouveaux (MN) de façon séparée afin de diminuer le nombre de tests réalisés pour chaque analyse.

Le plan de l'ANOVA est illustré au tableau 3.5. Dans ce tableau, chaque cellule représente la combinaison des niveaux de chaque facteur : Groupe (A) X Temps (B).

Tableau 3.5 Plan d'analyse complet de l'ANOVA à 4 cellules (2 X 2 niveaux)

Groupe (facteur A)	Temps (facteur B)	
	Prétest (B ₁)	Posttest (B ₂)
Groupe phono (A ₁)	A ₁ B ₁	A ₁ B ₂
Groupe global (A ₂)	A ₂ B ₁	A ₂ B ₂

Afin de réaliser cette ANOVA, les cartes statistiques individuelles issues de l'analyse de 1^{er} niveau ont été fournies pour chaque cellule.

Pour chacune des conditions d'intérêt (contrastes) spécifiés dans le modèle lors des analyses de 1^{er} niveau, il y avait donc :

- Cellule A₁B₁ : les cartes statistiques des participants du GrPhono en prétest;
- Cellule A₁B₂ : les cartes statistiques des participants du GrPhono en posttest;
- Cellule A₂B₁ : les cartes statistiques des participants du GrGlobal en prétest;
- Cellule A₂B₂ : les cartes statistiques des participants du GrGlobal en posttest.

Pour évaluer la significativité des effets, la procédure utilise la statistique *F* de Fisher qui représente un rapport entre la variance inter-groupes et la variance intra-groupe, en d'autres mots, un rapport entre la variance expliquée et la variance inexpliquée. La

statistique F est significative si la variance inter-groupes est considérablement plus grande que la variance intra-groupe. L'ANOVA à plan factoriel permet donc de mesurer les deux effets principaux du groupe et du temps ainsi que l'effet d'interaction entre ces facteurs (Groupe X Temps) à l'aide d'un seul modèle statistique basé sur la part de la variance totale expliquée. Dans le cadre de cette thèse, nous souhaitons comparer l'évolution de l'activité cérébrale dans le temps entre les deux groupes. L'effet d'intérêt était donc celui associé à l'interaction entre les deux facteurs.

Le logiciel *SPM8* offre deux options pour réaliser une ANOVA : *full factorial* ou *flexible factorial* (Ashburner *et al.*, 2012). Dans le cadre de ce projet, l'ANOVA a été réalisée en sélectionnant le design *flexible factorial*. Cette option était la plus intéressante, car elle inclut un facteur « sujet » qui permet de modéliser la variance des participants. Un des principaux avantages de ce design est donc un meilleur contrôle des différences individuelles entre les sujets, ce qui augmente le degré de liberté de l'analyse. Chaque participant devient en quelque sorte sa propre mesure contrôlée à travers les différentes conditions ce qui permet d'éliminer la variabilité de l'erreur expérimentale qui serait attribuable aux différences individuelles. La procédure a ainsi permis de calculer l'effet d'interaction, c'est-à-dire la modification de l'effet principal d'un facteur (groupe ou temps) en fonction de la variabilité de l'autre facteur.

Cependant, bien que l'ANOVA à plan factoriel permette d'identifier une différence dans l'effet jumelé du groupe et du temps, elle ne permet pas de déterminer le sens de cette différence dans les régions cérébrales identifiées. Des test-t sont donc nécessaires pour déterminer le sens des différences d'activation entre les deux groupes. Contrairement à l'ANOVA à plan factoriel qui repose sur la comparaison de la part de la variance expliquée, le test-t permet de tester statistiquement l'hypothèse d'égalité entre les moyennes du signal *BOLD* mesuré. Pour déterminer si des différences étaient

significatives entre les conditions au sein de chacun des groupes et quel était le sens de ces différences, des tests-t pairés de *Student* ont donc été utilisés.

Compte tenu de notre question de recherche, le sens des résultats de l'ANOVA a pu être précisé à partir des tests-t pairés suivants :

1. **GrPhono | post > pré** : Comparaison de l'activité cérébrale observée en posttest par rapport au prétest pour le GrPhono.
2. **GrGlobal | post > pré** : Comparaison de l'activité cérébrale observée en posttest par rapport au prétest pour le GrGlobal.

Ces tests-t pairés ont été réalisés uniquement lorsque l'effet d'interaction entre les deux facteurs mis en évidence par l'ANOVA était significatif.

Finalement, par souci de rigueur, les analyses ont été reproduites à l'aide de l'outil GLM_Flex_Fast2 (<https://habs.mgh.harvard.edu/researchers/data-tools>). Les scripts de cet outil fonctionnent avec Matlab. Contrairement à SPM8, ces scripts partitionnent les termes d'erreur plutôt que de les regrouper (c'est-à-dire qu'ils permettent la spécification de différents termes d'erreur pour chaque contraste) et peuvent donc être moins sensibles aux taux de faux positifs que les ANOVA incluant des mesures répétées réalisées avec l'outil SPM (McLaren et al., 2011; McFarquhar et al., 2019; Telzer et al., 2018). Une forme de validation des résultats significatifs issus de SPM a donc été obtenue en utilisant ce 2^e outil d'analyse qui permet de prendre en compte les mesures répétées dans l'ANOVA factorielle. Pour ce faire, il a été nécessaire d'adapter le script de GLM_Flex_Fast2 afin de l'appliquer au jeu de données du projet, en suivant les recommandations du créateur de ce script. Par le biais du forum de soutien technique, nous avons soumis le script modifié accompagné d'une brève description

du projet de recherche et des analyses souhaitées, de façon à s'assurer que les adaptations du script avaient été réalisées correctement.

3.6.2.2 Seuils de significativité

Tout comme les études quantitatives en éducation, les recherches en neuroéducation utilisant l'IRMf ont recours à un seuil de significativité (*threshold*) représenté par la lettre p (p -value). Le p permet d'évaluer la probabilité, sous H_0 , d'obtenir une statistique aussi grande que la valeur du test obtenue sur l'échantillon. Cet indice de probabilité fournit donc de l'information sur le degré de certitude des résultats de la recherche. En psychologie et dans les études quantitatives en éducation, le seuil standard utilisé, lorsqu'on réalise un test statistique, est $p < 0,05$. Cependant, en IRMf, les tests statistiques portent sur plusieurs centaines ou milliers (analyse par région d'intérêt), voire quelques centaines de milliers de voxels. À un seuil de probabilité de $p < 0,05$, un seuillage de 100 000 voxels pour une analyse en cerveau entier pourrait donner lieu à 5 000 voxels faux-positifs, et ce, même si aucun stimulus n'était présenté (Nichols et Hayasaka, 2003; Smith, 2004). En d'autres termes, plus le nombre de tests statistiques réalisés est grand, plus la chance d'obtenir des faux positifs comme celui cité en exemple est grande (Huettel *et al.*, 2008). On parle dans ce contexte de problème des comparaisons multiples. Le risque de faux positifs est maximal avec les méthodes d'analyse univariées, comme le modèle linéaire général, où un test statistique est effectué pour chaque voxel indépendamment. Plusieurs corrections peuvent donc être envisagées pour régler le problème des comparaisons multiples, prévenir les erreurs de type I et éviter de fixer arbitrairement le seuil statistique. Ces corrections prennent généralement en considération le nombre de tests statistiques réalisés et leur objectif est de diminuer la valeur de p . La correction de type *familywise error rate* (FWE) est souvent utilisée et est moins sévère et conservatrice qu'une correction de Bonferroni (Huettel *et al.*, 2008; Lieberman et Cunningham, 2009; Poldrack *et al.*, 2011) selon laquelle la valeur du p est divisée par le nombre de tests statistiques réalisés. Certains

logiciels, tels que *SPM* proposent ainsi un seuil FWE reposant sur la théorie des champs aléatoires (*random field theory*) (Adler et Taylor, 2007; Nichols et Hayasaka, 2003). Une autre correction utilisée est celle de type *false discovery rate* (FDR) (Genovese, Lazar et Nichols, 2002). Cette dernière est considérée comme étant encore plus libérale que la correction FWE (Huettel *et al.*, 2008; Poldrack *et al.*, 2011). Lorsque l'une de ces méthodes de correction est utilisée, on parle alors de seuils corrigés pour les comparaisons multiples, comparativement à des seuils qui ne seraient pas corrigés.

Déterminer le seuil de probabilité optimal n'est cependant pas toujours chose facile, considérant que l'on souhaite parvenir à un équilibre entre le risque de commettre une erreur de type I et celui de commettre une erreur de type II. Certains auteurs (Lieberman et Cunningham, 2009) reprochent aux recherches en neuroimagerie de trop se concentrer sur la correction des erreurs de type I, au détriment des erreurs de type II. Un bon compromis pourrait donc être de réaliser les analyses statistiques au niveau du *cluster* (regroupement de voxels) plutôt qu'au niveau du voxel lui-même (Thirion *et al.*, 2007). Lorsqu'on applique l'analyse statistique à chaque voxel du cerveau, on réalise une inférence qui se situe au niveau du voxel (*voxel-level inference*). On vérifie alors s'il y a une différence significative pour chacun des voxels, c'est-à-dire si le signal *BOLD* dépasse le seuil statistique choisi (Lazar, 2008). Or, il est aussi possible d'utiliser les informations spatiales de la carte d'activation pour regrouper les voxels activés en *cluster*. En effet, les régions significativement activées en IRMf ne se limitent pas, en règle générale, à un seul voxel, surtout si les données ont été lissées dans les prétraitements. En procédant de la sorte, il est alors possible de vérifier s'il existe une différence significative au niveau du groupe de voxels plutôt qu'au niveau de chaque voxel (Poldrack *et al.*, 2011; Smith, 2004). Cette méthode est assez commune (Poldrack *et al.*, 2011) et reconnue comme étant plus sensible pour détecter les activations que l'analyse au niveau du voxel (Friston *et al.*, 1996; Smith, 2004).

Dans le cadre de ce projet, il a été décidé de viser l'utilisation d'un seuil corrigé $p < 0,05$ de type FWE au niveau du *cluster* (Eklund et al., 2016), tel que le suggère SPM. Cependant, il n'a pas été possible d'observer des différences d'activation à un seuil corrigé, possiblement en raison d'une trop faible puissance statistique. Le nombre de participants dans chacun des groupes était en effet peu élevé, et dans certains cas, plusieurs séries de données ont dû être éliminées en raison du mouvement, ce qui réduit au final le nombre de données analysées, diminue considérablement la puissance statistique et augmente les chances de commettre une erreur de type II. De plus, cette étude cherchait à mesurer les effets d'interventions pédagogiques qui étaient utilisées pour la première fois et dont les paramètres n'avaient jamais été validés dans le cadre de projets antérieurs. Puisqu'il n'a pas été possible d'obtenir des résultats à un seuil corrigé, nous avons choisi de présenter les résultats obtenus à un seuil non-corrigé, mais plus restrictif de $p < 0,005$, pour des activations formées de minimalement 20 voxels, en faisant toutefois preuve de grande prudence dans l'interprétation de ces résultats. Plusieurs auteurs encouragent en effet la communication de résultats non-corrigés, principalement pour une utilisation potentielle dans des méta-analyses ultérieures (voir par exemple, Poldrack et al., 2017; Roiser et al., 2016), mais ils soulignent l'importance de ne pas réaliser d'inférences à partir de résultats qui ne survivent pas à la correction pour des comparaisons multiples, ce à quoi nous porterons donc une attention particulière.

3.6.2.3 Analyse par région d'intérêt

Le logiciel *SPM* génère par défaut un masque du cerveau entier qui contient tous les voxels en commun entre toutes les cartes statistiques individuelles générées lors des analyses à effets aléatoires. Ce masque est un volume utilisé pour circonscrire l'analyse à une section particulière du cerveau. Comme cette étude repose sur des hypothèses de recherche (voir section 2.3) concernant une région précise du cerveau, il est également

possible de réaliser une analyse par région d'intérêt (*Region of interest - ROI*). Dans une analyse par région d'intérêt, des masques correspondant à certaines régions cérébrales ciblées sont utilisés pour comparer les activations. Ce type d'analyse restreint les analyses statistiques aux voxels associés à ces régions précises du cerveau plutôt que dans le volume entier, ce qui diminue le nombre de tests statistiques réalisés et contribue à pallier le problème des comparaisons multiples.

Considérant les hypothèses de recherche qui ont été formulées a priori, une analyse par région d'intérêt (Poldrack, 2007; Poldrack *et al.*, 2011) a donc été menée sur la région OTG pour les contrastes *SPM* issus de l'ANOVA. Pour ce faire, un masque de la région OTG a été réalisé en créant une sphère d'un rayon de 20 mm à partir des coordonnées Talairach suivantes : $x = -43$, $y = -54$, $z = -12$ (McCandliss *et al.*, 2003). Ces coordonnées ont été déterminées à partir d'un corpus de plus de 25 études de groupe pour lesquelles un pic d'activation était observable chez plus de 90 % des sujets lors de la lecture de mots, avec un écart-type de plus ou moins 5 mm (Cohen *et al.*, 2002; Cohen, Jobert, Le Bihan et Dehaene, 2004; Dehaene *et al.*, 2002; McCandliss *et al.*, 2003; Yeatman, Rauschecker et Wandell, 2013). Toutefois, comme certaines études ont identifié un pic d'activation qui dépasse ce 5 mm (voir par exemple Reinke, Fernandes, Schwindt, O'Craven et Grady, 2008), nous avons choisi d'utiliser un rayon de 20 mm qui représente un choix prudent et qui permettra de ratisser un peu plus large en élargissant la zone (et le nombre de voxels) dans laquelle seront conduits les tests. Nous faisons également ce choix en nous basant sur la technique d'analyse par région d'intérêt employée dans l'étude de Monzalvo et ses collaborateurs (2012) qui s'intéressait à la spécialisation de la région OTG auprès d'enfants âgés de 8 à 10 ans, ce qui est plus près de l'âge des participants de notre étude. Comme pour l'analyse du cerveau entier, nous avons d'emblée visé à présenter les résultats à un seuil corrigé $p < 0,05$ de type FWE, mais il n'a pas été possible d'obtenir des résultats à un seuil corrigé. Nous avons donc choisi de les présenter à un seuil de $p < 0,001$ non corrigé,

pour des activations formées de minimalement 20 voxels. Ce seuil est légèrement plus restrictif que celui retenu dans l'analyse du cerveau entier compte tenu que les analyses sont ici restreintes à une région précise du cerveau. Bien que ces résultats soient obtenus à un seuil non-corrigé, nous estimons qu'il demeure pertinent de les présenter dans le cadre de cette thèse puisqu'ils sont susceptibles de fournir des points de repères intéressant pour guider la conduite de projets futurs.

3.7 Considérations éthiques

La demande d'approbation éthique du présent projet a été traitée par le Comité mixte d'éthique de la recherche (CMER-RNQ) de l'UNF, un comité mandaté par le Ministère de la Santé et des Services sociaux qui possède une expertise spécifique liée à la recherche scientifique impliquant l'utilisation de l'IRMf (approbation éthique n° CMER RNQ 15-16-03).

3.7.1 Utilisation de l'IRMf

La technologie utilisée, l'IRMf, est sécuritaire et éprouvée. En effet, selon les connaissances actuelles, la participation à un examen d'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle n'entraîne aucun risque sur le plan médical, si le participant ne présente pas de contre-indication (Comité mixte d'éthique de la recherche du Regroupement Neuroimagerie/Québec). L'admissibilité à prendre part à une séance d'IRMf a été vérifiée pour chaque participant à l'aide d'un formulaire de dépistage pour étude en IRM (*voir Annexe G*). Les principales contre-indications empêchant de prendre part à une séance d'IRMf sont : la présence d'implants métalliques incompatibles avec l'appareil d'IRMf comme les simulateurs cardiaques, les prothèses

orthopédiques ou les débris métalliques.

Il est possible que les participants aient pu ressentir un certain inconfort dû au bruit important de l'appareil, mais l'utilisation d'écouteurs ainsi que d'un casque d'atténuation du bruit a permis de réduire considérablement ce possible désagrément. Les participants avaient d'ailleurs été prévenus, avant l'acquisition des données, que l'appareil émettait un bruit important et l'expérimentateur leur a tous fait écouter à l'avance les types de bruits émis par l'appareil, ceux-ci ayant été enregistrés, puis présentés à l'ordinateur. Cela avait pour objectif de diminuer le stress qu'auraient pu éprouver certains participants en entendant des bruits qui leur étaient inconnus.

De plus, le sentiment de claustrophobie que peut provoquer le fait d'être allongé à l'intérieur de l'appareil d'IRMf a été minimisé par la séance d'entraînement réalisée à l'école ainsi que dans le simulateur.

3.7.2 Obtention d'un consentement éclairé

Les participants de cette étude et leur parent ou tuteur légal ont tous participé de façon volontaire. Ils ont été avisés clairement qu'ils avaient le droit, à tout moment, de se retirer du projet, et ce, sans fournir aucune justification ni subir aucune pénalité.

Les parents/tuteurs légaux ont tous signé un formulaire de consentement (*voir Annexe H*) qui avait été préalablement approuvé par les comités éthiques de l'Université du Québec à Montréal et de l'UNF (Comité mixte d'éthique de la recherche du Regroupement Neuroimagerie/Québec). Le formulaire de consentement a été lu par le parent et expliqué au participant. Les termes de ce formulaire leur ont été expliqués et l'expérimentateur a répondu à toutes les questions de ces derniers. Une copie signée du formulaire a également été remise au parent de l'enfant.

3.7.3 Respect de la confidentialité et de l'anonymat

Les renseignements recueillis dans le cadre de cette recherche sont confidentiels. Les participants ont été identifiés par un numéro de code et la clé du code reliant le nom du participant à son dossier de recherche est conservée par le chercheur responsable du projet de recherche dans un lieu sécuritaire. De plus, afin de préserver l'anonymat de chacun, aucune publication ou communication scientifique ne renfermera d'éléments d'information pouvant permettre d'identifier un participant.

CHAPITRE IV

RÉSULTATS

Ce quatrième chapitre présente les principaux résultats obtenus à la suite de l'analyse des données. Dans un premier temps, les résultats comportementaux à la tâche cognitive sont présentés dans le but de connaître les effets des deux interventions sur la performance des participants. Puis, dans un deuxième temps, les résultats cérébraux sont présentés de façon à mettre en évidence les différences en termes d'activation cérébrale entre les deux groupes en fonction du temps (entre le prétest et le posttest). L'objectif principal de cette recherche étant de vérifier si une intervention dirigeant explicitement l'attention des participants vers les correspondances graphèmes-phonèmes peut mener à une plus grande activation dans la région OTG, seuls les résultats permettant le mieux de répondre à cette question sont présentés dans le cadre de cette thèse. L'accent est donc mis sur l'effet d'interaction entre les facteurs groupe et temps obtenu par l'ANOVA à plan factoriel ainsi que sur les tests-t pairés permettant d'identifier le sens de la différence observée. L'échantillon total à partir duquel les analyses ont été menées était composé de 24 participants (13 participants du groupe phonologique et 11 participants du groupe global).

4.1 Résultats comportementaux

L'objectif de la tâche d'appariement était d'observer les effets de chaque intervention sur l'activité cérébrale engendrée durant la lecture de mots entraînés et de mots nouveaux. Les participants devaient juger si l'appariement entre le mot lu et l'image de ce mot était correct ou incorrect (c'est-à-dire si l'image et le mot écrit représentaient la même chose).

Dans un premier temps, le tableau 4.1 présente les statistiques descriptives relatives à la performance moyenne de chacun des groupes, pour chaque type de mots, en prétest et en posttest.

Tableau 4.1 Performance moyenne de chacun des groupes en prétest et en posttest pour les deux types de mots

Type de mots	Groupe phonologique ($n = 13$)		Groupe global ($n = 11$)	
	Prétest	Posttest	Prétest	Posttest
Mots entraînés	0,60 (0,17)	0,84 (0,17)	0,61 (0,17)	0,81 (0,18)
Mots nouveaux	0,56 (0,15)	0,72 (0,11)	0,57 (0,15)	0,63 (0,13)

Note : L'écart type est présenté entre parenthèses.

À la lecture de ce tableau, on constate que les deux groupes se sont améliorés entre le prétest et le posttest, pour les deux types de mots.

Afin de répondre à la question de recherche, une ANOVA à mesures répétées a été réalisée pour comparer l'effet du groupe (phonologique ou global) sur la performance à la tâche en prétest et en posttest. Le tableau 4.2 présente d'abord le résultat de cette analyse pour les mots entraînés (ME).

Tableau 4.2 Résultats de l'analyse de variance à mesures répétées ayant comme variable dépendante la performance à la tâche pour les mots entraînés

Facteur	SC	ddl	CM	F	p	η^2 partiel
Temps	0,72	1	0,72	35,50	0,00	0,62
Temps * Groupe	0,00	1	0,00	0,142	0,71	0,01
Erreur (Temps)	0,44	22	0,02			

À la lecture de ce tableau, on constate que l'interaction Groupe X Temps pour ce type de mots n'était pas significative ($p > 0,05$). Seul l'effet principal du Temps était significatif, $F(1, 22) = 35,50$, $p < 0,05$, $\eta_p^2 = 0,62$. Selon les balises établies par Cohen (1988), cet effet est considéré comme étant de grande taille. Cela signifie que le temps avait un effet significatif sur la performance à la tâche pour la lecture des mots entraînés, mais que l'effet du temps sur la performance ne variait pas en fonction du groupe.

Le tableau 4.3 présente le résultat de l'ANOVA à mesures répétées pour les mots nouveaux (MN).

Tableau 4.3 Résultats de l'analyse de variance à mesures répétées ayant comme variable dépendante la performance à la tâche pour les mots nouveaux

Facteur	SC	ddl	CM	F	p	η^2 partiel
Temps	0,13	1	0,13	14,13	0,00	0,39
Temps * Groupe	0,04	1	0,04	4,36	0,05*	0,17
Erreur (Temps)	0,21	22	0,01			

* $p = 0,049 < 0,05$

Les résultats présentés dans ce tableau révèlent un effet principal du Temps significatif, c'est-à-dire que l'amélioration de la performance observée lors de la lecture des mots nouveaux entre le prétest et le posttest pour chaque groupe était significative. On note également à la lecture de ce tableau un d'interaction significatif Groupe X Temps pour ce type de mots, $F(1,22) = 4,36$, $p < 0,05$, $\eta_p^2 = 0,17$. Cet effet d'interaction signifie

que l'effet du temps sur la performance à la tâche variait en fonction du groupe pour les mots nouveaux. Si on se fie aux balises établies par Cohen (1988), cet effet est de grande taille.

Le graphique des moyennes marginales estimées qui suit permet de visualiser cet effet d'interaction. On y constate que l'amélioration de la performance moyenne entre le prétest et le posttest pour le groupe phonologique est plus importante que celle du groupe global.

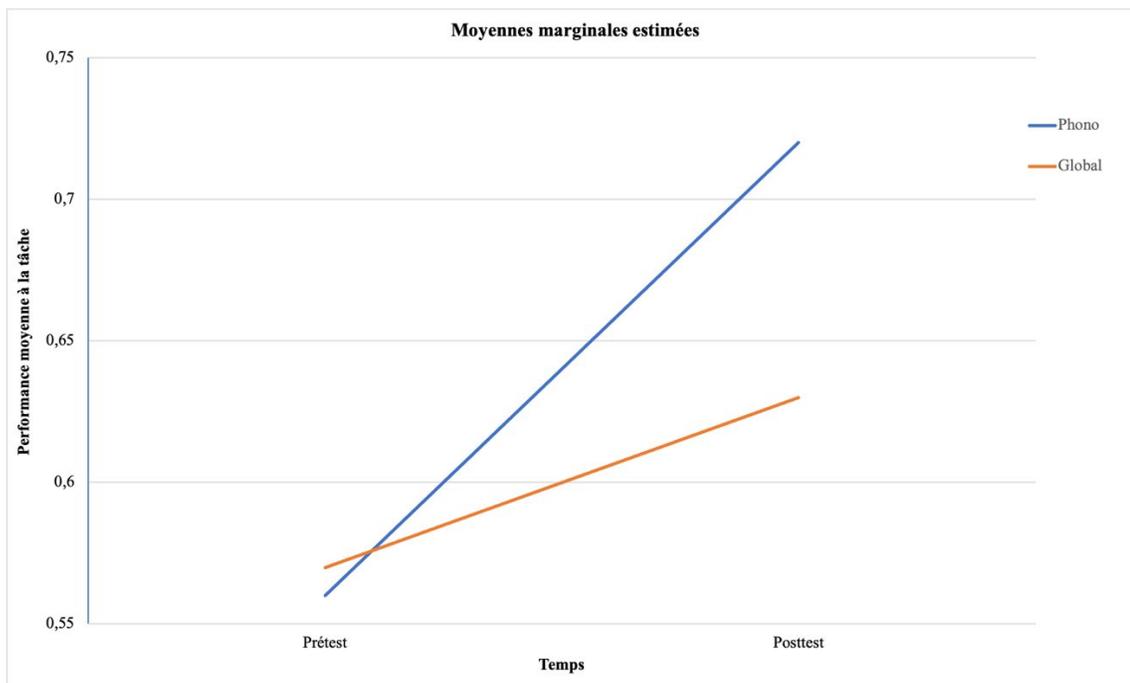


Figure 4.1 Représentation de l'effet d'interaction Groupe X Temps sur la performance à la tâche pour les mots nouveaux.

Ces résultats mènent à penser qu'il sera intéressant de porter une attention particulière aux mots nouveaux dans l'analyse des résultats cérébraux. Ces résultats sont présentés à la section qui suit.

4.2 Résultats cérébraux

Les prochaines sous-sections présentent les résultats de l'ANOVA à plan factoriel et des tests-t. L'objectif principal des analyses statistiques est de comparer comment l'activité cérébrale des deux groupes diffère dans le temps (entre le prétest et le posttest), pour chaque type de mots. La matrice de design issue de SPM est présentée à l'*Annexe I*.

4.2.1 L'effet d'interaction

Dans cette section, les résultats cérébraux de l'ANOVA à plan factoriel sont présentés d'abord selon une analyse du volume cérébral entier et, par la suite, selon une analyse par région d'intérêt.

4.2.1.1 L'analyse du volume cérébral entier

Les résultats de la section qui suit ont été réalisés à partir du volume cérébral entier, une analyse appelée *whole brain analysis*. Ces résultats sont présentés à un seuil statistique non corrigé de $p < 0,005$ et pour les activations comprenant un minimum de 20 voxels. Les tableaux des résultats indiquent les coordonnées des régions, l'aire de Brodmann correspondante, la valeur de F (statistique de Fisher) et la valeur de k (nombre de voxels) qui correspond à la taille des régions.

D'abord, les analyses ne révèlent aucun effet d'interaction Groupe X Temps significatif pour les mots entraînés (ME). L'effet d'interaction est cependant significatif lors de la lecture des mots nouveaux pour deux activations cérébrales dans l'hémisphère gauche : 1- une activation incluant le cortex occipito-temporal (BA37) et une région plus postérieure située dans le cortex extrastrié (BA19) et 2- activation dans

la région du cortex temporo-pariétal gauche (BA39). Ces résultats sont détaillés au tableau 4.4 ainsi qu'à la figure 4.1.

Tableau 4.4 Régions cérébrales significativement associées à l'interaction du groupe (phono/global) et du temps (prétest/posttest) issues de l'analyse du cerveau entier pour les mots nouveaux

Régions cérébrales	Aire de Brodmann (BA)	Coordonnées			<i>F</i>	<i>k</i>
		<i>x</i>	<i>y</i>	<i>z</i>		
Mots entraînés		n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
Mots nouveaux						
Cortex occipito-temporal /extrastrié gauche	BA 37/19	-36	-73	-12	21,80	39
Cortex temporo-pariétal gauche	BA 39	-48	-57	39	19,81	33

Note : analyse à effets aléatoires, $p_{(unc.)} < 0,005$, min. 20 voxels. L'identification des régions est réalisée à partir de l'atlas Talairach (Talairach & Tournoux, 1988a).



Figure 4.2 Régions cérébrales significativement plus activées par l'interaction du groupe (phono/global) et du temps (prétest/posttest) pour les mots nouveaux, $p_{(unc.)} < 0,005$, min. 20 voxels.

4.2.1.2 L'analyse par région d'intérêt

L'analyse de l'effet d'interaction a également été effectuée par le biais d'une analyse par région d'intérêt. Tel que détaillé à la section 3.6.2.3, le masque appliqué a restreint

les analyses aux voxels associés à la région cérébrale de l'hypothèse de recherche, soit le cortex OTG. Tel que détaillé dans cette même section, le masque de cette région d'intérêt a été défini à partir des coordonnées identifiées dans la littérature scientifique pour cette région, avec un rayon de 20 mm. Le tableau 4.5 présente les résultats de l'effet d'interaction Groupe X Temps découlant de l'analyse par région d'intérêt. Les résultats sont présentés à un seuil statistique non corrigé de $p < 0,001$.

Tableau 4.5 Régions cérébrales significativement associées à l'interaction du groupe (phono/global) et du temps (prétest/posttest) issues de l'analyse ROI pour les mots nouveaux

Régions cérébrales	Aire de Brodmann (BA)	Coordonnées			<i>F</i>	<i>k</i>
		<i>x</i>	<i>y</i>	<i>z</i>		
Mots entraînés		n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
Mots nouveaux						
Cortex occipito-temporal /extrastrié gauche	BA 37/19	-36	-73	-12	14,50	8

Note : analyse à effets aléatoires, $p_{(unc.)} < 0,001$, min. 20 voxels. L'identification des régions est réalisée à partir de l'atlas Talairach (Talairach & Tournoux, 1988a).

En somme, les résultats de l'analyse par région d'intérêt montrent que l'effet d'interaction est significatif à un seuil non corrigé, mais plus restrictif de $p < 0,001$ dans la région du cortex occipito-temporal/extrastrié gauche.

4.2.2 Le sens de l'effet d'interaction

Afin de vérifier le sens des effets observés à la section précédente, des tests-t pairés ont été réalisés. Tous les résultats sont présentés au seuil ($p < 0,001$ [non corrigé]) et pour un minimum de 20 voxels. L'aire de Brodmann correspondante, la valeur de *F* (statistique de Fisher) et la valeur de *k* (nombre de voxels) qui correspond à la taille des régions sont aussi présentées.

Aucune différence significative n'a été observée entre le posttest et le prétest (posttest > prétest) pour les mots entraînés, et ce, pour les deux groupes. Les résultats montrent cependant que pour les mots nouveaux, chez les participants du groupe global, l'activité cérébrale dans la région du cortex occipito-temporal/extrastré gauche est significativement plus importante en posttest, comparativement au prétest. Chez les participants du groupe phonologique, aucune région cérébrale n'est significativement plus activée en posttest par rapport au prétest. Les résultats des tests-t pairés démontrent donc que l'effet d'interaction significatif dans le cortex occipito-temporal/extrastré gauche observé pour les mots nouveaux semble vraisemblablement induit par la différence de l'activité cérébrale entre le posttest et le prétest dans le groupe global. Le tableau 4.6 présente les résultats de ce contraste d'intérêt (posttest > prétest) lors de la lecture des mots nouveaux pour les groupes phonologique et global. La figure 4.2 présente la localisation de l'activation cérébrale significative dans la région du cortex occipito-temporal/extrastré gauche.

Tableau 4.6 Régions cérébrales significativement plus activées en posttest lors de la lecture des mots nouveaux pour les groupes phonologique et global

Régions cérébrales	Aire de Brodmann (BA)	Coordonnées			<i>t</i>	<i>k</i>
		<i>x</i>	<i>y</i>	<i>z</i>		
Groupe phonologique		n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
Groupe global						
Cortex occipito-temporal /extrastré gauche	BA 37/19	-36	-73	-12	7,84	28

Note : analyse à effets aléatoires, $p_{(unc.)} < 0,005$, min. 20 voxels. L'identification des régions est réalisée à partir de l'atlas Talairach (Talairach & Tournoux, 1988a).

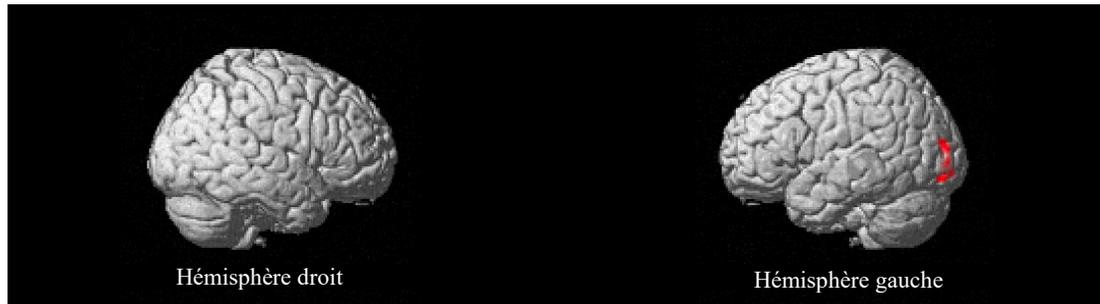


Figure 4.3 Région cérébrale significativement plus activée pour le contraste posttest > prétest lors de la lecture des mots nouveaux pour le groupe global, $p(\text{unc.}) < 0,005$, min. 20 voxels.

Des analyses ont également été réalisées dans un 2^e temps à l'aide de l'outil GLM_Flex_Fast2 afin de reproduire les résultats avec un algorithme d'analyse prenant en compte les mesures répétées. Ces analyses supplémentaires ont permis de confirmer les résultats obtenus à l'aide de SPM en identifiant la même région cérébrale impliquée dans l'interaction Groupe X Temps pour les mots nouveaux ainsi que le sens de cet effet en faveur du groupe global, à un seuil non-corrigé de $p < 0,005$.

4.3 Synthèse des résultats

Les résultats comportementaux issus de l'ANOVA à mesures répétées permettent d'abord d'observer un effet significatif du Temps sur la performance pour les mots entraînés, et ce, pour les deux interventions (phonologique et globale). Cependant, les participants du groupe phonologique présentent une amélioration significativement plus grande de leur performance entre le prétest et le posttest pour les mots nouveaux, comparativement aux participants du groupe global.

Sur le plan cérébral, les résultats de l'ANOVA à plan factoriel révèlent un effet d'interaction significatif Groupe X Temps uniquement pour les mots nouveaux, tel que le laissent présager les résultats comportementaux. Plus spécifiquement, l'analyse par région d'intérêt indique que cet effet d'interaction est significatif à un seuil non corrigé

de $p < 0,001$ dans la région du cortex occipito-temporal gauche. Les résultats des tests-t pairés qui ont été menés afin de préciser le sens de cet effet d'interaction démontrent que cet effet est induit par une différence significative de l'activité cérébrale entre le posttest et le prétest dans le groupe global.

CHAPITRE V

DISCUSSION

Ce projet de recherche avait pour objectif de répondre à la question suivante : est-ce que des approches d'enseignement distinctes qui sont associées à un apprentissage nécessitant du recyclage neuronal peuvent avoir un impact différent sur le fonctionnement cérébral et sur le recyclage neuronal? Il visait ainsi à déterminer les effets respectifs de deux interventions pédagogiques visant l'apprentissage de la lecture de mots, sur le fonctionnement cérébral, et plus spécifiquement sur la spécialisation de la région occipito-temporale gauche, centrale lors de la mise en place du recyclage neuronal. L'hypothèse était qu'une intervention orientant l'attention de lecteurs novices vers les correspondances entre les graphèmes et les phonèmes (intervention phonologique) aurait pour effet de faciliter davantage la spécialisation de la région occipito-temporale gauche, comparativement à une intervention orientant l'attention vers la forme entière du mot (intervention globale).

De façon opérationnelle, cette hypothèse a été étudiée dans le cadre d'une tâche cognitive de lecture de mots visant à observer la mobilisation de la région OTG associée au recyclage neuronal. Pour cette tâche, une confirmation de notre hypothèse se traduirait par une plus grande activation de la région OTG, chez les participants dont l'attention a été orientée vers l'unité d'analyse des correspondances graphèmes-phonèmes, ce qui constituerait un indice de la mise en place du recyclage neuronal.

Dans cette section, les résultats présentés au chapitre précédent sont interprétés afin de répondre à la question de recherche. Cette interprétation vise à établir des liens entre les résultats comportementaux, les activations cérébrales et l'hypothèse qui a été formulée, de façon à vérifier si cette dernière s'avère exacte. Or, considérant le nombre restreint de participants composant notre échantillon final, il importe de garder en tête dès le départ qu'une limite majeure concerne la faible puissance statistique de l'étude. Nous tenterons donc de faire émerger les interprétations les plus plausibles, mais prudentes, compte tenu de cette limite importante. À la suite de l'interprétation des résultats, cette limite centrale ainsi que d'autres sont identifiées et détaillées de façon à circonscrire leur influence sur les résultats obtenus. Puis, les retombées possibles des résultats font l'objet d'une discussion au regard de l'apprentissage et de l'enseignement. Des perspectives de recherches futures sont finalement présentées.

5.1 Retour sur la question et l'hypothèse de recherche

Les résultats du projet permettent de fournir certains éléments de réponse à la question de recherche dans la mesure où les deux interventions semblent en effet associées à une activité cérébrale différente. Cependant, les résultats obtenus ne correspondent pas à ce qui était attendu initialement et ne permettent pas de confirmer l'hypothèse telle que nous l'avions formulée. Cette hypothèse s'appuyait d'une part sur un vaste corpus de littérature scientifique portant sur l'acquisition de la lecture sur le plan cérébral. Ce corpus mettait en évidence la mise en place d'un processus de recyclage neuronal durant l'apprentissage de la lecture permettant à la région occipito-temporale gauche de se spécialiser pour reconnaître les symboles écrits du langage (Dehaene et Cohen, 2007; Dehaene, 2008; McCandliss *et al.*, 2003; Szwed *et al.*, 2011). Plusieurs recherches convergeaient également vers l'idée que plus un lecteur parvient à mobiliser cette région de son cerveau, plus la lecture apparaît efficace (Beaulieu *et al.*, 2005; Maurer *et al.*, 2005; Maurer *et al.*, 2010; Schlagger et McCandliss, 2007; Shaywitz *et*

al., 2002). Chez le lecteur expert, un réseau cérébral se développerait ainsi progressivement dans l'hémisphère gauche afin d'intégrer et de combiner l'information orthographique, mais aussi phonologique, lui permettant ultimement de comprendre ce qui est décodé sur le plan visuel (Hashimoto et Sakai, 2004; Marinkovic *et al.*, 2003; Monzalvo *et al.*, 2012). Notre hypothèse s'appuyait d'autre part sur des recherches somme toute moins nombreuses qui s'étaient penchées sur les effets de différentes interventions sur le fonctionnement cérébral et plus spécifiquement sur la spécialisation de la région occipito-temporale gauche. Ces recherches laissaient entendre que le fait de diriger explicitement l'attention vers un niveau d'analyse des correspondances lettres-sons était associé à une plus grande activation de la région occipito-temporale gauche (Brem *et al.*, 2010; Yoncheva *et al.*, 2010; 2015). À la lumière de cette littérature, nous avons donc émis l'hypothèse qu'une intervention de type phonologique mise en place auprès de lecteurs n'ayant pas débuté leur apprentissage de la lecture engendrerait une plus grande spécialisation de la région OTG, comparativement à une intervention de type globale, ce qui se reflèterait par une activité cérébrale plus prononcée dans cette région cérébrale pour ce groupe. Or, les résultats obtenus vont en sens inverse de ce qui avait été prédit : une activité cérébrale significativement plus grande a en effet été observée dans la région d'intérêt à la suite de l'intervention globale, comparativement à phonologique, lors de la lecture de mots nouveaux. Afin de réfléchir à la signification de ce résultat innattendu, nous faisons ressortir dans les sections qui suivent plusieurs éléments qui nous mènent à formuler, dans la plus grande prudence, une interprétation centrale nous apparaissant comme étant la plus plausible. Puis, nous présentons et discutons également d'une explication alternative.

5.2 Performance des deux groupes à la tâche de lecture

D'abord, sur le plan comportemental, les résultats indiquent que les deux groupes se sont améliorés de manière significative entre le prétest et le posttest pour lire les mots entraînés (effet significatif du Temps sur la performance des deux groupes pour ce type de mots). Cela n'est pas surprenant considérant que les participants s'entraînaient à lire un nombre limité de 20 mots peu complexes, pour un temps d'entraînement totalisant près de 7 heures. Il est donc logique de croire que, peu importe le type d'intervention mise en place, les participants ont ultimement été en mesure de s'améliorer significativement dans la lecture de ces mots. Tel que détaillé dans la section portant sur la méthodologie, les interventions avaient d'ailleurs été conçues de manière à maximiser l'apprentissage des élèves dans le temps (plusieurs courtes séances chaque semaine, nombre de répétitions élevé, interventions individualisées, etc.). Les jeux de révision informatisés qui étaient réalisés à la fin de chaque semaine (après chaque bloc de quatre périodes) permettaient en ce sens de s'assurer que les élèves parvenaient à lire les mots de l'intervention vus durant la semaine. Nous souhaitons en effet que les deux groupes puissent arriver à lire les mots de l'intervention, c'est-à-dire qu'ils aient tous réalisé un apprentissage, de façon à ce que les potentielles différences d'activité cérébrale observées ne soient pas simplement le reflet d'un apprentissage réalisé dans un groupe, et non dans l'autre. Nous considérons donc cette amélioration significative observée dans les deux groupes pour les mots entraînés comme étant nécessaire afin de pouvoir examiner la question de recherche sur le plan cérébral.

Pour les mots nouveaux, les résultats comportementaux indiquent un effet d'interaction significatif Groupe X Temps, en faveur du groupe phonologique. Cela signifie que l'amélioration de la performance moyenne entre le prétest et le posttest pour le groupe phonologique était plus importante que celle du groupe global. Ces résultats apparaissent également logiques considérant que les mots nouveaux étaient constitués

entièrement des mêmes correspondances graphèmes-phonèmes que les mots entraînés. Il était donc possible pour les participants du groupe phonologique de décoder les mots nouveaux à partir des correspondances qu'ils s'étaient explicitement fait présenter et qu'ils s'étaient entraînés à reconnaître à de nombreuses reprises. Ces résultats pourraient en ce sens être le reflet d'un mécanisme d'auto-apprentissage (*self-teaching mechanism*, Share, 1995) bien documenté dans la littérature (Thaler, Ebner, Wimmer et Landerl, 2004; Share, 2011; Ziegler, Perry et Zorzi, 2014), qui découle du développement des habiletés de décodage en lecture et permet à l'apprenant d'acquérir de façon autonome un lexique orthographique, c'est-à-dire de parvenir à lire seul de nouveaux mots (Snow et Juel, 2005). Les résultats obtenus laissent ainsi entendre que les participants du groupe phonologique avaient réellement appris les correspondances enseignées et qu'ils parvenaient à les décoder dans un autre contexte : celui des mots nouveaux. Or, pour les participants de l'intervention globale, les résultats témoignent d'une amélioration, mais moins importante que pour les participants du groupe phonologique. À notre sens, cela non plus n'est pas surprenant considérant que, contrairement aux participants du groupe phonologique, ils ne pouvaient pas s'appuyer sur un enseignement explicite des correspondances graphèmes-phonèmes qui les aurait amenés à pouvoir décoder les mots nouveaux, étant donné que leur attention avait été dirigée explicitement vers la forme visuelle entière des mots. Ces résultats concernant la performance pour la lecture des mots nouveaux convergent d'ailleurs avec ceux de l'étude de Yoncheva et de ses collaborateurs (2010), qui a servi de point d'ancrage à ce projet. En effet, dans le cadre de cette étude qui visait à comparer les effets respectifs de deux interventions (phonologique et globale) sur l'apprentissage de la lecture de mots fictifs auprès de participants adultes (revoir la section 2.2 pour les détails de ce projet), ils ont observé que les participants de l'intervention globale présentaient une moins bonne performance (58 %) que ceux du groupe phonologique (79 %) pour la lecture de mots ne faisant pas partie des interventions, mais s'appuyant sur les mêmes correspondances.

En somme, l'amélioration de la performance du groupe phonologique pour la lecture des mots nouveaux nous mène donc à penser que ceux-ci s'appuyaient réellement sur une stratégie phonologique durant leur lecture pour ce type de mots. Pour les participants du groupe global, cette plus faible amélioration pour les mots nouveaux laisse plutôt entendre, à première vue, qu'ils cherchaient toujours à s'appuyer sur la stratégie de reconnaissance de la forme entière du mot qui avait été mise de l'avant dans le cadre de leur intervention. Néanmoins, les résultats obtenus sur le plan cérébral nous obligent à questionner davantage cette dernière interprétation.

5.3 Différences d'activation cérébrale observées

Les résultats liés à la performance des participants fournissent des premières pistes d'information intéressantes quant à l'apprentissage qui a été réalisé pour chacune des interventions. Or, bien que les deux interventions aient mené à une amélioration significative de la lecture pour les mots entraînés, nous souhaitons vérifier si les mécanismes cérébraux mobilisés durant la lecture à la suite de ces interventions étaient différents en fonction de l'intervention reçue. Des études ont en effet montré que deux interventions qui mènent à des changements similaires sur le plan comportemental ou même à une absence de changement peuvent être associées à des différences importantes sur le plan cérébral (Lee, Lim, Yeong, Ng, Venkatraman et Chee, 2007; Sohn *et al.*, 2004). Ces informations apparaissent pertinentes pour le domaine de l'éducation parce qu'elles peuvent nous renseigner sur la nature du travail cognitif réalisé par l'apprenant et potentiellement mettre en évidence certaines différences entre les interventions, même si celles-ci sont associées à des gains équivalents au niveau comportemental. Cela pourrait par exemple être le cas parce que certains changements peuvent se produire dans le cerveau avant qu'ils ne soient remarqués au niveau comportemental ou encore parce que les mesures comportementales telles que la performance ou le temps de réaction ne sont pas toujours vraiment représentatives de

l'apprentissage en tant que tel. Par exemple, plusieurs écrits scientifiques en didactique des sciences (voir p. ex., article fondateur de Viennot, 1978) mettent de l'avant l'idée selon laquelle un élève peut obtenir de bons résultats à un test en apprenant à exécuter un algorithme particulier, mais ce résultat n'est pas forcément le reflet d'une réelle compréhension conceptuelle du phénomène scientifique. Cette situation représente un exemple pertinent pour lequel les informations cérébrales peuvent contribuer à apporter des informations supplémentaires sur la nature de l'apprentissage réalisé (Brault Foisy *et al.*, 2015; Brault Foisy, Matejko, Ansari, & Masson, 2020). Par exemple, il a été démontré dans la littérature scientifique qu'une compréhension conceptuelle de certains phénomènes scientifiques passe par le développement de la capacité à inhiber (c'est-à-dire résister) certaines conceptions intuitives très répandues et qui sont fortement ancrées chez une grande proportion des apprenants (Allaire-Duquette *et al.*, 2019). Pour plusieurs conceptions scientifiques, il semble que même les experts de très haut niveau aient toujours recours au contrôle inhibiteur afin de raisonner de manière scientifique. Pour cet exemple, les données cérébrales peuvent donc fournir des informations quant à la mobilisation du contrôle inhibiteur en processus de raisonnement scientifique auxquelles il serait difficile d'avoir accès uniquement à l'aide de données comportementales. Si l'on observait une faible mobilisation des régions typiquement liées au contrôle inhibiteur dans ce contexte, cela pourrait ainsi donner lieu à une réflexion pédagogique visant à aider l'apprenant à faire preuve de contrôle inhibiteur lorsque la situation l'exige. De façon générale, l'identification du contrôle inhibiteur comme étant un mécanisme cérébral mobilisé pour certains apprentissages scientifiques permet donc de réfléchir l'enseignement de façon à ce que l'apprenant développe la capacité à faire preuve de contrôle inhibiteur lorsque cela est nécessaire (voir Potvin [2013] pour une discussion plus élaborée à ce sujet).

Dans le contexte de l'apprentissage de la lecture de mots, il devient ainsi intéressant de voir si les deux interventions mises en place sont associées à des corrélats cérébraux

distincts, c'est-à-dire si elles se différencient quant à la façon dont l'information est traitée sur le plan cérébral. Ces informations cérébrales ne peuvent bien entendu pas déterminer à elles seules quelle intervention pédagogique est la plus efficace dans l'absolu, mais elles peuvent néanmoins indiquer si celles-ci influencent différemment le fonctionnement (ou même la structure) du cerveau. Dans ce cas-ci, la prise en compte des données cérébrales représente donc une façon additionnelle d'observer et de comprendre l'impact de l'enseignement sur l'apprentissage.

Or, avant même de discuter en détail de la différence qui a été observée entre les groupes sur le plan cérébral, nous tenons à rappeler que les résultats cérébraux présentés au chapitre précédent ne sont pas significatifs à un seuil corrigé et que, même si nous mettons ici en lumière des éléments d'interprétation que nous jugeons pertinents pour les besoins de cette thèse, nous avançons ces pistes d'interprétation de manière prudente et raisonnable, sous la forme d'hypothèses explicatives et non d'inférences directes ou de certitudes.

Dans un premier temps, les résultats cérébraux issus de l'ANOVA à plan factoriel indiquent qu'il n'existe pas de différence significative entre les deux groupes, à la suite des interventions, lors de la lecture des mots entraînés (pour lesquels une amélioration de performance a été observée pour les deux types d'intervention). Face à ce résultat, des tests-t pairés supplémentaires visant à comparer l'activité cérébrale en posttest à celle du prétest lors de la lecture des mots entraînés (contraste posttest > prétest pour les ME) ont également été réalisés pour chaque groupe de façon isolée et n'ont révélé aucune différence significative, tant pour le groupe phonologique que global. Notre interprétation de ce résultat est que cette absence de différence est probablement dûe à un manque de puissance statistique faisant en sorte que même si les stratégies ont peut-être mené au recrutement de régions cérébrales distinctes, le manque de puissance statistique ne nous a pas permis de déceler cette différence. Cela pourrait aussi signifier

que les participants des deux groupes ont recruté les mêmes régions cérébrales lorsqu'ils lisaient les mots pour lesquels ils s'étaient entraînés, à la suite de leur intervention respective. Selon cette hypothèse, les deux interventions auraient pu mener à la mobilisation des mêmes mécanismes cérébraux et à l'utilisation d'une même stratégie de lecture des mots entraînés : soit parce que les participants du groupe phonologique ont instinctivement reconnu des mots de façon globale malgré l'intervention mise en place ou bien, à l'inverse, parce que les participants du groupe global ont découvert les correspondances graphèmes-phonèmes et se sont mis à décoder des mots, ce qui, combiné à une petite puissance statistique, a diminué les chances de détecter une différence entre les deux groupes. Bien qu'incertaines, ces hypothèses nous apparaissent plausibles considérant qu'environ 7 heures ont été consacrées à l'apprentissage de seulement 20 mots. Il est donc possible que les participants du groupe global aient découvert implicitement certaines correspondances graphèmes-phonèmes ou encore que les participants du groupe phonologique se soient mis à reconnaître de façon très instantanée l'image globale de certains mots en cessant en quelque sorte de porter attention aux correspondances (Shankweiler et Flower, 2004). Ces résultats pourraient mener à penser que notre intervention aurait pu créer une forme de « surentraînement » en raison de son intensité combinée à un trop faible niveau de complexité de la tâche, ce qui aurait pu ultimement rendre plus difficile de départager les effets des deux interventions. Cette idée est reprise et discutée plus en détail un peu plus loin.

Pour les mots nouveaux, les résultats de l'ANOVA factorielle indiquent toutefois qu'il existe une différence significative entre les deux groupes sur le plan cérébral, à la suite des interventions (effet d'interaction Groupe X Temps significatif) dans : 1- une région englobant une partie du cortex occipito-temporal et une partie plus postérieure dans le cortex extrastrié de l'hémisphère gauche ainsi que 2- la région du cortex temporal-pariétal gauche. Les tests-t pairés qui ont été réalisés afin de préciser le sens de cet effet d'interaction (posttest > prétest pour chaque groupe) ont quant à eux indiqué qu'il n'y

avait aucune différence pour le groupe phonologique, mais qu'une activation significativement plus grande était observée dans la région du cortex occipito-temporal/extrastrié gauche à la suite de l'intervention globale. À première vue, ce résultat semble pour le moins paradoxal puisque la performance des participants de ce groupe ne s'est pas améliorée significativement à la suite de l'intervention, contrairement au groupe phonologique. Or, la lecture de mots nouveaux représente possiblement un contexte permettant de contraster davantage les effets des deux interventions que celui de la lecture des mots entraînés, puisque ce contexte place en quelque sorte les deux groupes de participants dans une situation où ils ne se situent pas au même stade de leur apprentissage de la lecture : les participants du groupe phonologique connaissent déjà les correspondances graphèmes-phonèmes et peuvent réutiliser ces connaissances pour lire les mots nouveaux, alors que l'on peut supposer que les participants du groupe global se situent à un niveau très novice au regard de l'apprentissage de ces correspondances étant donné qu'elles ne leur ont pas été enseignées explicitement.

Plusieurs questions émergent face à l'obtention de ces résultats cérébraux. D'abord, que peut signifier cette plus grande activation pour le groupe global dans cette région du cerveau? Ensuite, pourquoi cette activation est-elle observée en faveur du groupe global, comparativement au groupe phonologique? Et finalement, pourquoi aucune différence d'activation n'est-elle observée entre le prétest et le posttest pour le groupe phonologique? Pour chacune de ces questions, nous proposons ci-bas une discussion et tentons de faire ressortir des pistes d'explications plausibles, mais néanmoins hypothétiques.

5.3.1 Différence d'activation observée pour le groupe global

Avant même de s'intéresser à la différence entre les groupes, il semble pertinent de chercher à mieux comprendre ce que peut signifier la différence d'activation observée entre le prétest et le posttest lors de la lecture des mots nouveaux pour le groupe global. Le rôle du cortex occipito-temporal gauche a été largement détaillé dans le cadre théorique de cette thèse. Il s'agit d'une région cérébrale située dans la voie ventrale du traitement de l'information visuelle. Cette voie ventrale, s'étendant de l'aire visuelle primaire (V1) vers le lobe temporal, serait principalement en charge de la reconnaissance et de l'identification des objets en traitant leurs propriétés visuelles dites « intrinsèques » telles que leur forme, leur couleur, etc. En comparaison, la voie dorsale s'étendant vers le lobe pariétal aurait davantage pour fonction de traiter visuellement les éléments permettant le contrôle visuo-moteur des objets, tels que leur position spatiale ou leur taille. Dans la voie ventrale, l'information visuelle pénètre d'abord par le cortex visuel primaire et est transmise via les aires visuelles secondaires du cortex extrastrié jusqu'aux régions du lobe temporal inférieur (pour une synthèse du modèle à deux voies, voir Milner, 2017). Les régions du cortex extrastrié possèdent à la fois la capacité de segmenter un objet en un ensemble de parties constitutives et d'intégrer ces parties en un tout cohérent. La région du cortex extrastrié de l'hémisphère gauche située à la jonction occipitale et temporale de la voie ventrale, aussi connue sous le nom de cortex (ou gyrus) occipito-temporal gauche est reconnue pour son rôle important dans l'acquisition de la lecture (Eden et Zeffiro, 1998; Pugh *et al.*, 2001; Shaywitz *et al.*, 2002; Simos *et al.*, 2002). Tel que détaillé dans le cadre théorique, plusieurs études indiquent que cette région détiendrait une sensibilité élevée (Centanni *et al.*, 2017), voire même un haut niveau de spécificité pour la reconnaissance des mots écrits (Rossion, Joyce, Cottrell et Tarr, 2003; Vigneau, Jobard, Mazoyer et Tzourio-Mazoyer, 2005). Il a aussi été montré que le fait de porter attention aux lettres de façon isolée était associé à une plus grande activité dans cette région cérébrale (Flowers *et al.*, 2004). D'autres études ont également mis en lumière une conception plus interactive du rôle

de cette région : celle-ci permettrait en effet d'intégrer les informations visuelles se rapportant aux symboles écrits de la langue avec les informations dites « supérieures », se rapportant à la prononciation ou encore à la sémantique (Price et Devlin, 2011). L'activation de cette région a d'ailleurs été observée pour des situations autres que la reconnaissance visuelle des mots écrits, telle que la lecture du Braille (Reich, Szwed, Cohen et Amedi, 2011). Selon plusieurs chercheurs, le rôle de la région occipito-temporale gauche serait donc possiblement davantage associé à une fonction d'intégration plutôt qu'uniquement à une fonction de spécialisation pour la reconnaissance visuelle des mots écrits (Price et Devlin, 2011). La fonction précise de la région occipito-temporale pourrait ainsi être modulée en fonction de ses interactions avec d'autres régions du cerveau. Cette perspective d'intégration est également en cohérence avec la théorie du recyclage neuronal : la région occipito-temporale gauche serait en effet la mieux disposée pour se spécialiser afin de réaliser l'intégration de ces différentes informations compte tenu de sa fonction initiale, ainsi que de sa localisation dans l'hémisphère gauche, près de la région temporo-pariétale responsable de la conversion phonologique ainsi que des autres régions du langage.

Dans le cadre de ce projet, la plus grande activation observée chez les participants du groupe global dans cette région cérébrale, en posttest comparativement au prétest, laisse donc entendre qu'ils portaient une attention particulière aux composantes des mots écrits, possiblement aux lettres, et qu'ils essayaient d'établir des liens entre ces informations visuelles et leurs caractéristiques phonologiques, à la suite de l'intervention. La plus grande activation de la région temporo-pariétale gauche mise en évidence par l'ANOVA contribue également à renforcer cette interprétation, considérant le rôle marqué de cette région dans le traitement phonologique (Temple *et al.*, 2003). Il semble d'ailleurs que la région temporo-pariétale gauche serait davantage activée et jouerait un rôle plus important dans les premières étapes de l'apprentissage de la lecture (Meyler *et al.*, 2008). Nous croyons donc qu'il est plausible que les

participants du groupe global, lorsque placés dans une situation où ils ne pouvaient pas s'appuyer sur la stratégie de lecture mise de l'avant dans leur intervention (la reconnaissance globale des mots) ont tenté de porter une attention plus grande à des éléments qu'ils avaient possiblement commencé à découvrir implicitement durant l'intervention, c'est-à-dire les correspondances entre les lettres et les sons. La plus grande activation observée dans la région occipito-temporale/extrastriée gauche pourrait ainsi représenter un indice d'un début de spécialisation de cette région pour les symboles écrits du langage ainsi qu'une amorce d'intégration des informations visuelles et phonologiques, ce qui laisse croire que les participants du groupe global avaient peut-être commencé à découvrir certaines correspondances graphèmes-phonèmes, même si ce début d'apprentissage n'était pas encore perceptible de manière significative sur le plan de la performance. D'ailleurs, les coordonnées de la région identifiée dans nos analyses apparaissent très près spatialement de celles de la région de la forme visuelle des lettres (*letter-form area*, voir Thesen *et al.*, 2012) dont l'activation précéderait temporellement celle de la région de la forme visuelle des mots. Nous émettons donc l'hypothèse que cette plus forte activation en posttest comparativement au prétest témoigne d'une spécialisation de cette région et possiblement d'une amorce de recyclage neuronal en lien avec l'utilisation d'une stratégie de décodage encore nouvelle et peu automatisée.

En appui à cette interprétation, les résultats obtenus aux tests standardisés réalisés auprès des participants en prétest indiquent que ceux-ci présentaient déjà certaines habiletés de base au regard de prérequis à la lecture, tels que la reconnaissance des lettres de l'alphabet et la conscience phonologique (voir section 3.2.3). Ils étaient donc certes novices en lecture et n'étaient pas capables de lire des mots, mais ces habiletés pourraient tout de même laisser entendre qu'ils avaient conscience que les mots écrits sont composés de lettres (graphèmes) auxquelles sont associés des sons (phonèmes),

ce qui aurait pu les amener à porter une certaine attention à ces éléments dans le cadre de leur intervention.

5.3.2 Sens de la différence entre les groupes

Bien qu'elle demeure au stade de la simple hypothèse, l'interprétation proposée dans la section précédente présente une certaine logique puisque les participants du groupe global, se trouvant dans l'impossibilité d'utiliser la stratégie de lecture pour laquelle ils s'étaient entraînés lorsque confrontés à des mots nouveaux, ont possiblement tenté de se raccrocher à d'autres indices afin de lire les mots. Cependant, il demeure étonnant que la comparaison des deux groupes mette en évidence une activation plus grande (post > pré) pour le groupe global que phonologique, car même s'il s'avérait que les participants du groupe global ont effectivement employé une stratégie de décodage pour ces mots, il aurait été logique de penser que les participants du groupe phonologique l'auraient également fait, et plus fortement. Or, les résultats des tests-t pairés réalisés pour chaque groupe pour les mots nouveaux montrent qu'aucune différence significative n'était décelable entre le prétest et le posttest pour le groupe phonologique. Cette absence de différence significative entre le prétest et le posttest pour le groupe phonologique a donc elle-même visiblement contribué à l'obtention de cette différence significative entre les groupes.

Nous soulevons également la possibilité qu'une plus grande mobilisation de la région occipito-temporale gauche en posttest chez les participants du groupe global puisse être le reflet, non pas d'une meilleure spécialisation de cette région cérébrale découlant de leur intervention, mais d'un plus grand besoin pour ces participants de mobiliser cette région en raison d'un effort de décodage plus grand à fournir dans le contexte des mots nouveaux où leur stratégie de reconnaissance globale ne peut être utilisée. Cette hypothèse laisse entendre que l'intensité de l'activation de la région occipito-temporale

gauche observée serait davantage liée à l'effort de lecture requis et non à son degré de spécialisation ou de recyclage. Cela pourrait également contribuer à expliquer pourquoi cette différence a pu être détectée chez le groupe global, contrairement au groupe phonologique. Afin de mieux évaluer cette possibilité, nous avons contrasté l'activité cérébrale mesurée en posttest chez les participants du groupe global lors de la lecture des mots nouveaux, comparativement aux mots entraînés (MN > ME). Ce faisant, nous n'avons pas obtenu de différence significative entre les deux conditions, mais avons été en mesure d'observer une faible différence en faveur des mots nouveaux, ce qui pourrait indiquer que les participants du groupe global avaient légèrement aussi recours au décodage de certaines correspondances pour les mots entraînés, mais mobilisaient somme toute peu la région occipito-temporale gauche, car ils utilisaient surtout une stratégie de reconnaissance globale. Pour les mots nouveaux, il apparaît vraisemblable qu'ils se soient appuyés de façon plus importante sur cette région considérant qu'ils n'avaient pas d'autres options que de recourir à cette stratégie pour tenter de lire les mots. L'effort mobilisé pour intégrer les informations visuelles et phonologiques aurait dans ce cas été potentiellement plus grand, ce qui pourrait expliquer cette plus grande mobilisation de la région d'intérêt.

Or, il n'en demeure pas moins que l'absence de différence significative entre les deux moments de collecte (post > pré) pour le groupe phonologique nous apparaît intrigante. La prochaine section propose donc d'envisager différentes explications à cette absence de différence.

5.3.3 Absence de différence pour le groupe phonologique

Notre hypothèse initiale était qu'une différence plus grande entre le prétest et le posttest serait observable dans la région d'intérêt en faveur du groupe phonologique, comparativement au groupe global. Or, non seulement la différence entre les groupes

ne se présente pas dans la direction anticipée, mais nous n’observons pas non plus de différence significative entre le prétest et le posttest lorsque l’on s’intéresse spécifiquement à l’activité cérébrale du groupe phonologique. À notre sens, au moins deux éléments pourraient contribuer à expliquer ce résultat.

Une première explication pourrait découler du fait que les participants du groupe phonologique détenaient déjà des habiletés initiales plus grandes en lien avec le décodage avant la mise en place de l’intervention, ce qui pourrait contribuer à diminuer l’écart entre le prétest et le posttest et rendre plus difficile l’obtention d’une différence observable sur le plan cérébral. Au début du projet, nous avons comparé la performance des deux groupes aux tests standardisés, à la suite de la répartition aléatoire des participants, afin de s’assurer de l’équivalence des groupes (voir tableau 3.2). Or, tel que cela a été détaillé dans la méthodologie, l’attrition expérimentale à différentes étapes du projet a fait en sorte que le nombre de participants dans chacun des groupes a diminué. Les informations présentées au tableau 3.3 indiquent en ce sens que les participants des groupes de l’échantillon final se distinguaient initialement au regard de la reconnaissance des lettres et de la conscience phonologique, avant même la mise en place des interventions. Les données révèlent en effet que les participants composant le groupe phonologique ($n = 13$) présentaient initialement un score de reconnaissance des lettres ($M = 19,92/110$, $ET = 5,81$) ainsi qu’un score de conscience phonologique ($M = 20,02/60$, $ET = 4,08$) significativement plus élevés (respectivement $t(22) = 2,33$, $p = 0,03$ et $t(22) = 2,35$, $p = 0,03$) que ceux des participants composant le groupe global ($n = 11$; reconnaissance des lettres : $M = 14,83/110$, $ET = 4,13$, conscience phonologique : $M = 16,14/60$, $ET = 3,96$). Il semblerait donc que l’attrition expérimentale ait fait en sorte d’exacerber le contraste entre les deux groupes sur le plan de leurs habiletés initiales. Les participants du groupe phonologique présentaient ainsi des habiletés plus grandes pour des éléments qui sont reconnus comme étant associés au décodage des correspondances graphèmes-phonèmes (Anthony et

Lonigan, 2004; Byrne et Fielding-Barnsley, 1989; Carroll et Snowling, 2004; Dufour-Martel et Good, 2009; Stuart et Coltheart, 1988) avant même de prendre part à l'intervention. Cela pourrait donc signifier que ces derniers avaient déjà commencé à spécialiser la région occipito-temporale gauche et à mettre en place un processus de recyclage neuronal avant de prendre part au projet, ce qui pourrait contribuer à la faiblesse de l'effet mesuré, en raison d'un écart moindre entre les niveaux initial et final. Ces informations laissent également penser que les participants du groupe phonologique détenaient, possiblement en raison de leurs habiletés initiales, mais également à la suite de leur participation à l'intervention phonologique, un très fort niveau d'automatisation des correspondances graphèmes-phonèmes. Les élèves du groupe global ont quant à eux débuté le projet avec des habiletés associées au décodage un peu moins grandes, et ont pris part à une intervention qui ne présentait pas explicitement les correspondances graphèmes-phonèmes. Bien que les résultats cérébraux laissent croire qu'ils ont peut-être été en mesure de découvrir certaines correspondances graphèmes-phonèmes de manière implicite, il est logique de penser que leur niveau d'automatisation de ces correspondances demeurerait tout de même moins élevé que celui des participants du groupe phonologique. C'est d'ailleurs ce que reflètent les résultats comportementaux. Cependant, il a peut-être tout de même été plus facile de détecter l'effet mesuré, en raison d'un écart plus marqué entre les niveaux initial et final ainsi qu'en raison du très grand effort de décodage déployé par les participants de ce groupe en contexte de mots nouveaux, comparativement aux participants du groupe phonologique qui n'avaient peut-être pas besoin de porter un niveau d'attention très élevé aux correspondances compte tenu d'un plus haut niveau d'automatisation.

Une deuxième hypothèse explicative de cette absence de différence pour le groupe phonologique pourrait aussi être associée aux caractéristiques des interventions et de la tâche de lecture de mots. En effet, nous avançons l'hypothèse que l'intensité des

interventions mises en place en termes de durée et de fréquence, pour un total de près de 7 heures d'intervention individualisée, pourrait avoir contribué à l'obtention d'un contraste moins prononcé entre les effets respectifs de chaque intervention. De plus, nous avons fait le choix de sélectionner des correspondances graphèmes-phonèmes simples formant des mots réguliers de 3 à 6 lettres présentant pour la plupart une structure syllabique fréquente de type consonne-voyelle. Or, plusieurs études indiquent que les effets de l'enseignement sur le fonctionnement cérébral peuvent être observables assez rapidement auprès de participants enfants (par exemple, moins de quatre heures d'entraînement sur huit semaines dans l'étude de Brem *et al.*, 2010) et de participants adultes (40 heures d'entraînement sur quatre semaines dans l'étude de Xue *et al.*, 2006; seulement une séance de 40 minutes dans l'étude de Yoncheva *et al.*, 2010; deux séances de 50 minutes dans l'étude de Yoncheva *et al.*, 2015). Dans notre étude, non seulement les interventions avaient été conçues de manière à maximiser l'apprentissage des mots entraînés pour chacun des groupes, mais en plus la tâche de lecture des mots qui était réalisée dans l'appareil d'imagerie était en tout point similaire aux quiz récapitulatifs réalisés à la fin de chacune des semaines d'intervention. Pour les participants du groupe phonologique, cela a pu faire en sorte qu'ils parviennent à développer un très haut niveau d'automatisation des correspondances graphèmes-phonèmes, faisant ainsi en sorte qu'ils n'avaient pas à porter une grande attention à ces correspondances lorsque les mots leur étaient présentés durant la tâche de lecture. Dans le cas des mots entraînés, ils les reconnaissaient peut-être presque instantanément (Rayner, Pollatsek et Schotter, 2012) et dans le cas des mots nouveaux, il est possible de croire que l'effort de décodage à fournir était somme toute peu élevé. En comparaison, les participants du groupe global arrivaient possiblement à reconnaître très rapidement les mots entraînés, mais devaient fournir un important effort de décodage pour les mots nouveaux en portant une grande attention aux informations visuelles des lettres composant chaque mot ainsi qu'à leur représentation sur le plan phonologique pour tenter de les lire et de fournir une réponse. L'intensité des interventions combiné à la facilité de la tâche de lecture de mots a donc peut-être fait

en sorte que les participants du groupe phonologique en sont venus à trop fortement automatiser les correspondances graphèmes-phonèmes et que les participants du groupe global, à force de revoir les mêmes mots à de nombreuses reprises, ont découvert certaines correspondances de manière implicite. Selon cette explication, on aurait cependant pu s'attendre à ce que la performance des participants des deux groupes pour les mots entraînés soit plus élevée et avoisine un taux de réussite de 100 %. Or, nous croyons que la performance des participants n'invalide pas l'hypothèse avancée compte tenu de leur jeune âge, de l'environnement inhabituel de l'IRM, du fait qu'ils ne voyaient pas les boutons de la manette de réponse lorsqu'ils fournissaient leur réponse, et finalement parce que les réponses pour lesquelles les participants ont omis de répondre ont été comptabilisées comme de mauvaises réponses dans le calcul de leur performance, ce qui fait en sorte que leur performance à la tâche ne reflète pas uniquement les items réussis.

À la lumière de tous ces éléments, nous avançons l'hypothèse qu'il est possible que l'activité cérébrale observée pour le groupe global corresponde ainsi d'une certaine façon à l'activité qui était attendue dans le groupe phonologique chez qui l'on présumait observer une plus grande spécialisation de la région occipito-temporale à la fin de l'intervention. Les caractéristiques des interventions et de la tâche de lecture ont potentiellement introduit une variable confondante, correspondant à leur niveau d'attention ou d'engagement cognitif dans la tâche de lecture. Il semble ainsi que pour observer la spécialisation de la région occipito-temporale gauche, il aurait été plus avantageux de réaliser des interventions moins intensives, ou de collecter les données davantage au début du processus d'apprentissage, ce qui aurait possiblement permis de mieux contraster les effets des deux interventions. Cela est discuté plus en détail dans la section présentant les limites du projet ainsi que les pistes de recherches futures.

En somme, les résultats comportementaux et cérébraux obtenus ne permettent ni de confirmer ni d'infirmier notre hypothèse de départ : celle-ci pourrait en effet demeurer recevable. À la lumière de nos résultats, l'interprétation que nous jugeons la plus plausible, et qu'il vaudrait la peine d'investiguer davantage dans le cadre de projets futurs, est que l'intervention globale, possiblement en raison de son intensité et de la faible complexité des mots entraînés, a permis aux participants de commencer à découvrir implicitement un certain nombre de correspondances graphèmes-phonèmes. Cela aurait ainsi pu faire en sorte qu'ils ont réussi à s'appuyer au moins partiellement sur une stratégie de décodage dans le contexte de la lecture des mots nouveaux, tel qu'indiqué par la plus forte mobilisation de la région occipito-temporale/extrastriée gauche à la suite de l'intervention pour ce type de mots.

5.4 Discussion d'une explication alternative

L'interprétation proposée ci-haut apparaît plausible au regard de différents éléments, à la fois comportementaux et cérébraux, ainsi qu'en raison des caractéristiques générales des interventions et de la tâche de lecture de mots. Cette interprétation découle également de la littérature de recherche ayant documenté l'acquisition de la lecture sur le plan cérébral, laquelle nous avait menés à formuler notre hypothèse de recherche. Néanmoins, par souci de rigueur, il apparaît essentiel de discuter et d'évaluer la plausibilité d'une explication alternative: celle selon laquelle l'activation plus forte observée en faveur du groupe global dans la région d'intérêt à la suite de l'intervention pourrait signifier qu'une intervention de type global faciliterait davantage la spécialisation de la région occipito-temporale gauche et, possiblement, la mise en place du recyclage neuronal.

Selon cette interprétation, la plus grande activation serait le reflet d'une meilleure spécialisation de la région occipito-temporale gauche à la suite de l'intervention

globale, comparativement à phonologique. Néanmoins, cette interprétation nous semble peu probable pour plusieurs raisons. D'abord, parce que la littérature scientifique met en évidence que le recyclage neuronal et la spécialisation de la région occipito-temporale gauche vont de pair avec de meilleures habiletés de lecture (Beaulieu *et al.*, 2005; Brem *et al.*, 2010; Maurer *et al.*, 2005; Maurer *et al.*, 2010; Schlagger et McCandliss, 2007; Shaywitz *et al.*, 2002; Yoncheva *et al.*, 2010; 2015). Or, ce n'est pas ce qui est observé sur le plan comportemental dans notre projet : les participants du groupe global présentent une amélioration moindre que les participants du groupe phonologique pour les mots nouveaux. Il semble donc peu probable que leur plus forte activation de la région OTG soit associée à une meilleure spécialisation (recyclage neuronal) de cette région. De plus, bien qu'une amélioration significative de la performance soit observée chez ce groupe pour les mots entraînés (effet significatif du temps sur la performance), cette amélioration n'est pas associée à une activité cérébrale plus grande dans la région occipito-temporale gauche. Si cela avait été le cas, il aurait été plus plausible de croire que cette activation soit représentative d'une plus grande amorce de recyclage neuronal.

Ensuite, les études à partir desquelles a été réfléchi ce projet de recherche convergent toutes vers des résultats similaires : la spécialisation de la région occipito-temporale gauche émerge à la suite d'un entraînement dirigeant l'attention des participants vers les correspondances entre les graphèmes et les phonèmes (Bitan *et al.*, 2005; Brem *et al.*, 2010; van de Walle de Ghelcke, Rossion, Schiltz et Lochy, 2020; Xue *et al.*, 2006; Yoncheva *et al.*, 2010; 2015). Ce projet visait à aller plus loin en utilisant un devis comparatif afin de vérifier si une intervention dirigeant explicitement l'attention des participants vers ces correspondances permettait de faire émerger davantage cette spécialisation auprès de lecteurs novices, comparativement à une intervention dirigeant leur attention à un autre niveau d'analyse : celle de la forme entière du mot. Bien qu'il soit surprenant de ne pas pouvoir observer une plus grande spécialisation chez le

groupe phonologique à la suite de l'intervention, tel que nous laissait croire le corpus scientifique sur lequel nous nous sommes basés pour ce projet, nous estimons qu'il serait peu raisonnable d'interpréter l'activité plus importante observée dans le cortex occipito-temporal/extrastrié gauche comme étant représentative d'une plus grande spécialisation et possiblement d'une mise en place plus avancée du recyclage neuronal à la suite de l'intervention globale.

Nous croyons ainsi qu'il demeure plus probable que l'intervention globale ait ultimement permis aux participants d'amorcer la spécialisation de la région occipito-temporale gauche en raison du fait qu'ils ont découvert implicitement certaines correspondances graphèmes-phonèmes. Cela reviendrait donc en quelque sorte à dire que c'est l'attention dirigée à un niveau d'analyse phonologique qui aurait permis cette amorce de spécialisation fonctionnelle, et non l'attention portée à la forme entière des mots.

5.5 Considérations éducatives

Bien qu'il s'ancre initialement dans une problématique concernant l'identification de pratiques éducatives appuyées par la recherche, ce projet s'inscrit principalement dans une perspective de recherche fondamentale puisqu'il visait à acquérir de nouvelles connaissances sur la relation entre l'enseignement et le fonctionnement cérébral, sans envisager une application immédiate de ces connaissances pour le milieu de l'éducation. Néanmoins, plusieurs études comportementales ont mis en évidence que le type d'approche pédagogique en lecture mise en place auprès des élèves constituerait l'une des variables ayant le plus grand impact sur les performances futures des enfants en lecture, plus encore que des variables telles que le milieu socio-économique, la réussite générale de l'élève en maternelle ou le niveau d'expérience des enseignants (Braibant et Gérard, 1996; Goigoux, 2000; Deauvieux, 2013). Il convient donc de réfléchir aux

considérations éducatives des premiers résultats que nous avons obtenus, bien que ceux-ci incitent à la plus grande prudence. Certains éléments nous apparaissent en ce sens intéressants à discuter.

D'abord, nos résultats concernant la performance en lecture des participants sont convergents avec ceux de plusieurs études (Deauvieu et Terrail, 2018) et méta-analyses (Ehri *et al.*, 2001; Rayner *et al.*, 2001) ayant mis en évidence que les approches d'enseignement de type phonologique (parfois aussi appelées alphabétiques) semblent plus efficaces que les autres approches (incluant les approches de type global et les approches mixtes) pour l'apprentissage de la lecture de mots, car elles permettent de développer une capacité d'auto-apprentissage chez l'apprenant. Il semble même que ces approches soient associées à une plus grande amélioration en lecture chez les enfants à risque de présenter des difficultés ultérieures en lecture ou issus d'un milieu socio-économique défavorisé (Ehri *et al.*, 2001; Rayner *et al.*, 2001; Goigoux, 2016). À l'inverse, la seule exposition visuelle aux mots ou encore le fait de ne pas recourir à la phonologie semble avoir pour effet de limiter la capacité de l'apprenant à apprendre de lui-même de nouveaux mots (Share, 1999; Kyte et Johnson, 2006; De Jong, Bitter, Van Setten et Marinus, 2009). Nos résultats appuient ces constats, puisque les participants du groupe phonologique présentent une amélioration significativement plus grande entre le prétest et le posttest pour la lecture des mots nouveaux qui n'avaient pas été entraînés dans le cadre de l'intervention, mais qui s'appuyaient sur les mêmes correspondances graphèmes-phonèmes. Il semble donc que sur le plan de la performance en lecture de mots, l'intervention phonologique apparaisse plus convaincante que l'intervention globale.

Sur le plan cérébral, les résultats nous portent à croire que des interventions pédagogiques distinctes semblent avoir un impact différent sur l'activité de certaines régions du cerveau durant l'apprentissage de la lecture de mots. Cela est en soi

intéressant, car bien que l'on sache déjà que l'apprentissage modifie l'architecture du cerveau et, inversement, que l'architecture cérébrale influence l'apprentissage, ces informations seraient de peu d'utilité sur le plan de l'enseignement si les enseignants et les autres intervenants du milieu scolaire ne pouvaient pas, par les choix pédagogiques qu'ils font, avoir un effet sur le fonctionnement cérébral de leurs élèves (Masson et Brault Foisy, 2014). Or, s'il s'avère que l'interprétation que nous proposons des résultats obtenus est exacte, il semblerait que les deux interventions mises en place dans le cadre de ce projet ne produisent pas les mêmes effets sur le plan cérébral. Pour toutes les raisons évoquées dans la discussion, il demeure néanmoins difficile à ce stade de comparer leurs effets dans le cadre d'une réflexion pédagogique plus concrète.

Les résultats cérébraux laissent possiblement présager qu'en raison de leur exposition répétée aux mots de l'intervention, les participants de l'intervention globale ont pu découvrir implicitement certaines correspondances graphèmes-phonèmes, probablement en raison du fait que le cerveau détient la capacité, à force de répétition, de détecter les régularités, ce à quoi on réfère souvent par l'idée d'apprentissage statistique (Barlow, 2001; Turk-Browne, Jungé et School, 2005; Turk-Browne, Scholl, Chun et Johnson, 2009). Dans le cas des participants du groupe global de ce projet, il s'agirait probablement d'une détection de la régularité statistique entre les composantes visuelles du mot et leur prononciation, de la même façon que le cerveau parvient à détecter des régularités dans plusieurs autres contextes tels que la compréhension et l'anticipation de la structure du discours oral (Gervain, Macagno, Cogoï, Peña et Mehler, 2008) ou encore les caractéristiques visuelles intrinsèques d'objets menant à leur reconnaissance visuelle (Turk-Browne, Isola, Scholl et Treat, 2008). Cela pourrait signifier que d'un point de vue éducatif, il apparaît pertinent de chercher à maximiser l'exposition des élèves aux mots écrits en début d'apprentissage de la lecture, car le cerveau semble être en mesure de détecter certaines régularités au sein du système alphabétique et d'inférer des relations entre les lettres et les sons. Cependant, cette

exposition seule ne serait probablement pas suffisante pour que l'enfant parvienne à automatiser les correspondances et à lire de façon autonome les mots nouveaux qui ne lui auraient pas été enseignés. En effet, bien que nos résultats ne nous permettent pas de confirmer ou d'infirmer notre hypothèse, nous croyons qu'ils demeurent plus compatibles avec l'idée selon laquelle un enseignement explicite et systématique de la relation entre les lettres et les sons permet d'automatiser plus rapidement les correspondances entre les graphèmes et les phonèmes. Le fait de favoriser les opportunités de contact avec l'écrit (c'est-à-dire l'exposition fréquente et répétée à différents mots écrits), en complémentarité avec un enseignement phonologique explicite, pourrait donc être intéressant dans la mesure où cette exposition pourrait contribuer au renforcement de ces correspondances. Il importe toutefois de nuancer ces propos en soulignant que les mots utilisés dans le cadre de ce projet étaient des mots réguliers, pour lesquels chaque graphème correspondait à un phonème. Or, certains chercheurs soutiennent que des interventions de nature globale seraient possiblement plus efficaces pour l'apprentissage de mots irréguliers, c'est-à-dire de mots pour lesquels les correspondances habituelles de transcodage graphème-phonème ou phonème-graphème ne fonctionnent pas (p. ex. les mots « femme », « monsieur », « oignon », « fils », etc.) (Levy & Lysynchuk, 1997; Karemaker et al., 2010). Des recherches supplémentaires apparaissent donc nécessaires afin de comparer les effets sur le plan cérébral des deux interventions pour l'apprentissage de ce type de mots, d'autant plus que certains résultats de recherche indiquent que la mobilisation du cortex occipito-temporal peut être modulée en fonction de ce qui est lu : mots, pseudomots ou non-mots (Pattamadilok et al., 2015).

5.6 Limites de la présente recherche

Lors de l'élaboration de cette recherche, les choix ont été faits avec un grand souci de rigueur méthodologique, tout en tenant compte d'une série de contraintes logistiques. Nous avons par exemple cherché à contrôler au mieux la variabilité interindividuelle

en recrutant initialement un nombre équivalent de filles et de garçons et en nous assurant de les répartir également dans les deux groupes. Nous nous sommes également assurés de maintenir un faible écart d'âge entre les participants. Nous avons cherché à réduire les effets potentiels de variables confondantes en nous assurant notamment de mettre en place les deux interventions de la même façon (choix des mots, fréquence, durée, etc.), de sorte que la différence entre ces interventions réside dans le niveau d'analyse sur lequel l'attention était dirigée. Nous avons également contrôlé la sélection des mots nouveaux afin qu'ils soient équivalents aux mots entraînés au regard de plusieurs critères, tel que leur niveau de complexité. Or, bien que de nombreuses précautions méthodologiques aient été prises en amont de la réalisation du projet, cette étude présente tout de même certaines limites qui incitent à faire preuve de prudence dans l'interprétation des résultats.

Certaines limites concernent en premier lieu l'échantillon de notre recherche. D'abord, comme toute étude, le fait que les participants aient été recrutés sur une base volontaire peut affecter la validité externe de la recherche. En effet, certaines caractéristiques personnelles des participants volontaires (ou de leurs parents) peuvent différer de celles des participants n'ayant pas désiré participer (p. ex., leur témérité, leur curiosité pour la lecture ou encore le fort désir des parents que leur enfant apprenne à lire et qui pourrait être associé à un environnement familial plus riche en littératie, etc.), ce qui aurait pu affecter la représentativité de l'échantillon par rapport à la population qu'il est censé représenter, c'est-à-dire tous les enfants de niveau préscolaire n'ayant pas débuté leur apprentissage formel de la lecture. Nous croyons cependant que la répartition aléatoire des participants dans chacun des groupes ainsi que l'utilisation d'un devis comparatif ont permis de minimiser cette limite, sans toutefois l'éliminer complètement. Il demeure donc important de la reconnaître.

Ensuite, bien que le devis de recherche ait initialement été conçu dans le but d'assurer une puissance statistique suffisante en ciblant un effectif de plus de 20 participants par groupe (Desmond et Glover, 2002; Murphy et Garavan, 2004), l'attrition expérimentale a fait diminuer considérablement la taille de chacun des groupes à 13 participants dans le groupe phonologique et 11 participants dans le groupe global. En raison de cette attrition, les deux groupes n'étaient d'ailleurs plus équivalents au regard de leurs habiletés initiales de reconnaissance des lettres et de conscience phonologique, ce qui ajoute une variable confondante dans l'interprétation des effets de chaque intervention.

La petite taille de notre échantillon a en plus limité la puissance statistique des analyses, ce qui a réduit la probabilité de détecter des effets qui pourraient réellement exister. En effet, une petite taille d'échantillon implique que les caractéristiques de chaque individu ont plus de poids dans la moyenne estimée du groupe. Cela augmente donc la probabilité que certaines autres variables confondantes puissent biaiser les résultats et diminue de ce fait la répliquabilité de l'étude (Turner et al., 2018). Par exemple, bien qu'aucun des participants n'ait déclaré de trouble d'apprentissage, il demeure possible que certains d'entre eux en présentaient (p. ex., dyslexie), mais que cela n'ait pas encore été diagnostiqué vu leur jeune âge. D'autres particularités individuelles, telle qu'une maturation cérébrale plus lente pouvant influencer la densité de matière grise et blanche dans différentes régions du cerveau ainsi que le fonctionnement cérébral (Durston, Hulshoff Pol, Casey, Giedd, Buitelaar et van Engeland, 2001), pourraient également avoir une incidence non négligeable sur l'activité cérébrale moyenne de chaque groupe. Bref, en raison de caractéristiques personnelles, d'habiletés ou d'expériences différentes, certains participants auraient pu être moins réceptifs à l'intervention et, compte tenu de la petite taille de chaque groupe, cela aurait pu avoir une incidence somme toute assez importante, surtout sur le plan cérébral.

La puissance statistique est également influencée par la force estimée de l'effet à observer. Dans le cadre de ce projet, il n'était pas possible d'estimer la puissance

statistique nécessaire pour capter les effets attendus, puisque l'ampleur de ces effets n'était pas connue a priori . Nous étions toutefois d'avis, dès le départ, que l'effet de chacune des interventions ne serait possiblement pas si grand, surtout considérant que ces interventions étaient comparées entre elles et qu'elles présentaient de nombreuses similitudes. C'est la raison pour laquelle un plus grand nombre de participants aurait été préférable. De plus, l'utilisation d'un protocole événementiel pour présenter les stimuli de la tâche de lecture est susceptible d'avoir aussi contribué à diminuer la puissance de nos résultats. En effet, l'utilisation d'un protocole en blocs regroupant tous les stimuli associés à une même condition permet d'optimiser la montée du signal *BOLD* et d'atteindre plus facilement un plateau d'activation. La plus grande amplitude du signal *BOLD* mesuré augmente ainsi le rapport signal sur bruit, c'est-à-dire la moyenne de l'intensité du signal mesuré par rapport à l'importance de la variation du bruit, ce qui peut faciliter la détection d'une différence. Le protocole événementiel présente pour sa part tous les stimuli séparément et de manière aléatoire, ce qui rend plus difficile l'atteinte d'un plateau d'activation. Cependant, une organisation en blocs ne permettait pas de répondre à la question de recherche, puisque regrouper les appariements de type correct ou incorrect ou encore les mots entraînés ou nouveaux aurait pu créer une habitude de la réponse des participants. Un protocole en bloc n'aurait pas non plus permis de distinguer l'activité cérébrale associée au moment de lecture du mot de celle associée à la présentation de l'image/son. Le choix d'un protocole événementiel a possiblement limité notre capacité à mettre en évidence des différences d'intérêt entre les groupes. Néanmoins, il semble que nous ayons obtenu une puissance statistique suffisante pour mettre en évidence certaines différences, probablement les plus importantes, mais il demeure possible que d'autres différences existantes soient passées sous le radar.

Une autre limite de l'étude concerne les deux interventions en lecture qui ont été mises en place. Ces interventions ont été conçues spécifiquement aux fins de la présente recherche et ont donc été utilisées pour la première fois dans ce projet. Or, il est possible,

tel que cela a été discuté précédemment, que la durée totale, la fréquence ou encore le choix d'une approche individualisée aient rendu plus difficile la détection d'une différence entre les groupes, à la suite des interventions. De plus, bien que nous nous soyons assurés que les participants sélectionnés ne savaient pas lire au début de l'étude, il demeure probable qu'au fil des semaines, ces derniers aient tout de même appris certaines correspondances graphèmes-phonèmes dans leur milieu scolaire ou familial, implicitement ou non. En ce sens, les enfants des deux groupes d'intervention ont peut-être été soumis à certaines notions qui ont pu affecter leurs capacités de lecture (p. ex. les interventions mises en place par l'enseignante dans le contexte de la maternelle, les habitudes familiales telles que les habitudes de lecture des parents ou de la fratrie, etc.) Cela a pu contribuer à amoindrir la différence souhaitée entre les interventions.

Par ailleurs, il importe aussi de mentionner que ce projet de recherche s'intéressait à une question de nature assez fondamentale et que, dans cet esprit, les interventions ne visaient pas à être représentatives de ce qui se fait en salle de classe. Nous avons fait le choix de comparer les interventions qui nous apparaissaient être les plus contrastées et qui s'appuyaient sur des travaux de recherche existants. Cela fait en sorte qu'il n'est pas possible d'aboutir à des retombées pédagogiques directes, et que les résultats ont somme toute une portée limitée en termes d'implications sur le plan éducatif. Les interventions mises en place visaient de plus à ce que les participants apprennent un nombre limité de mots simples. Les conclusions de ce projet se rapportent donc à l'apprentissage de mots peu complexes comportant un nombre limité de lettres et formés de correspondances graphèmes-phonèmes simples. Elles ne permettent pas de caractériser un niveau de lecture plus complexe pour lequel d'autres considérations sont susceptibles d'entrer en jeu.

Nous croyons également qu'une autre limite de ce projet concerne la tâche de lecture de mots qui a été réalisée par les participants durant les séances d'imagerie. En effet,

cette tâche permet d'obtenir une mesure de l'activité cérébrale en contexte de lecture de mots (entraînés ou nouveaux), et donc d'observer l'effet de chaque intervention sur le fonctionnement cérébral des participants durant la lecture, mais elle ne permet peut-être pas d'appréhender le processus de recyclage neuronal avec suffisamment de précision. Nous sommes d'avis qu'elle représente un point de départ intéressant, mais que les informations qu'elle permet de recueillir fournissent des éléments de réponses limités au volet de notre question de recherche qui s'intéressait, de manière plus précise, aux effets distincts de chaque intervention sur la mise en place du recyclage neuronal. Une tâche cognitive permettant d'explorer avec plus de précision l'organisation de la mosaïque ventrale gauche (voir p. ex., Dehaene *et al.*, 2010) à la suite des interventions pourrait en ce sens représenter un ajout pertinent et complémentaire. Cette idée est d'ailleurs approfondie dans la section suivante.

En plus de ces limites que nous venons d'identifier en lien avec le devis de recherche, les choix méthodologiques et l'échantillonnage, d'autres limites concernent également de façon plus spécifique l'utilisation d'une approche neuroscientifique en éducation. En effet, l'IRMf a été utilisée dans cette recherche afin de mesurer l'activité cérébrale des participants lors d'une tâche de lecture de mots relativement simple. Or, l'apprentissage de la lecture est un phénomène complexe et multidimensionnel et il ne nous apparaît pas possible de penser comment faciliter l'apprentissage de la lecture uniquement à partir de données cérébrales. L'approche neuroscientifique en éducation permet d'apporter un éclairage supplémentaire sur les mécanismes cérébraux liés à l'apprentissage de la lecture et sur les effets de certaines interventions, mais il nous apparaît essentiel de tenir compte de ces résultats en complémentarité avec les résultats obtenus par d'autres approches de recherche qui s'intéressent à d'autres aspects du phénomène (éducatifs, émotifs, psychologiques, sociaux, etc.).

Le contexte particulier de l'IRMf dans lequel a été réalisée la tâche de lecture est également associé à un certain nombre de contraintes, qui font partie des limites de la recherche. L'une de ces contraintes concerne le type de tâche qui peut être demandé aux participants. Dans le cadre de ce projet, les participants devaient, à l'intérieur de l'appareil, lire les mots présentés à l'écran en bougeant le moins possible. Un mot était ensuite entendu par le participant, qui devait appuyer sur un bouton pour signifier si le mot entendu était le même que le mot lu. Ce type de question à choix forcé (correct ou incorrect) fait en sorte que l'on ne peut pas réellement savoir si la performance mesurée est bien le reflet des habiletés de lecture du participant, puisque ce dernier avait une chance sur deux de répondre correctement. De plus, la nature expérimentale de cette tâche et l'environnement particulier de collecte font en sorte que le contexte de la recherche apparaît éloigné du contexte de la salle de classe.

Enfin, il est important de rappeler que l'interprétation des données d'IRMf et, conséquemment, les retombées potentielles du projet pour l'éducation, sont limitées par les connaissances actuelles sur le fonctionnement du cerveau. Bien que l'acquisition de la lecture sur le plan cérébral soit déjà bien documentée dans la littérature scientifique, le rôle de la région occipito-temporale gauche devra continuer à être précisé afin de mieux comprendre son implication dans l'apprentissage de la lecture et, surtout, son interaction avec d'autres régions mobilisées durant la lecture. De plus, encore peu de recherches ont à ce jour cherché à mesurer les effets d'interventions pédagogiques sur le fonctionnement cérébral, dans le cadre d'une tâche en lecture. Cela contribue assurément à l'originalité de ce projet, mais rend par ailleurs l'interprétation des résultats obtenus plus fragile parce que moins bien documentée.

Finalement, il importe de reconnaître que l'interprétation des résultats de cette recherche, bien que formulée de manière très hypothétique, a été réalisée en discutant de certains processus cognitifs à partir de l'activité cérébrale observée, sans mesurer

explicitement et directement ces processus cognitifs, ce qui constitue une inférence inverse (Aguirre, 2003; Poldrack, 2006; Hutzler, 2014). Or, ce processus d'inférence inverse (qui n'est pas uniquement propre aux études en neuroimagerie) peut être problématique s'il est réalisé de manière imprudente. Plusieurs auteurs sont cependant d'avis que les inférences inverses sont informatives et détiennent même un pouvoir prédictif élevé, si elles sont utilisées de façon rigoureuse (Hutzler, 2014). En effet, la validité d'une interprétation découlant d'une inférence inverse dépend largement du processus cognitif étudié, de la spécificité de la région cérébrale observée et de la qualité de la tâche utilisée (Hutzler, 2014; Poldrack, 2011). Dans le cadre de ce projet, l'hypothèse de recherche s'appuyait sur un vaste corpus scientifique ayant documenté la lecture sur le plan cérébral. De plus, la principale région cérébrale étudiée, la région occipito-temporale gauche, présente somme toute un niveau de spécificité élevé et la tâche avait été conçue de façon à bien pouvoir isoler le moment de lecture du mot. Néanmoins, les résultats obtenus n'ont pas su atteindre un seuil corrigé, ce qui constitue une limite importante à la réalisation d'inférences. C'est la raison pour laquelle nous avons souhaité présenter nos interprétations sous forme d'hypothèses explicatives prudentes.

5.7 Quelques perspectives de recherches futures

Cette recherche visait à comparer les effets de deux interventions pédagogiques en lecture sur le fonctionnement cérébral et la mise en place du recyclage neuronal. Les résultats obtenus proposent déjà quelques pistes de réflexion intéressantes. Néanmoins, ces derniers ne permettent ni de confirmer ni d'infirmer l'hypothèse que nous avons formulée selon laquelle une intervention de nature phonologique pourrait faciliter davantage la mise en place du recyclage neuronal, comparativement à une intervention de nature globale. Dans un premier temps, nous proposons donc un certain nombre de recommandations susceptibles de bonifier le projet de recherche actuel et de mener à

l'obtention de résultats plus convaincants. Puis, dans un deuxième temps, nous discutons de quelques perspectives de recherches complémentaires qui permettraient d'approfondir davantage la relation entre l'enseignement et le recyclage neuronal, et ultimement de faire émerger des réflexions pédagogiques plus précises qui seraient profitables au milieu de l'éducation.

5.7.1 Propositions pour bonifier le projet de recherche actuel

La section précédente mettait en relief plusieurs limites à ce projet. À la lumière des limites qui ont été identifiées, nous proposons ici certaines pistes susceptibles de mener à l'obtention de résultats qui permettraient de vérifier plus clairement l'hypothèse de recherche. D'abord, dans l'espoir de maximiser la puissance statistique, nous sommes d'avis qu'il serait important de collecter des données sur un échantillon plus grand, en raison de la grande attrition expérimentale dûe au jeune âge des participants. Nous recommandons de recruter initialement deux groupes d'au moins 30 participants chacun (40 participants par groupe étant encore mieux), puisqu'il semble que le taux d'échec (incapacité à réaliser la séance d'imagerie, rejet des données en raison d'un mouvement trop important, etc.) dans le cadre d'une recherche en imagerie menée auprès d'enfants d'environ 5 ans peut atteindre plus de 50 %, et ce, malgré les précautions mises en place (Byars *et al.*, 2002). Dans cette optique, nous considérons possiblement collecter des données supplémentaires dans un futur rapproché afin d'augmenter la puissance statistique de l'étude.

Nous croyons également que pour maximiser les chances d'observer une différence entre les deux interventions sur le plan cérébral, il pourrait être intéressant de chercher à complexifier l'apprentissage en incluant un plus grand nombre de mots contenant davantage de correspondances graphèmes-phonèmes au sein des interventions, car bien que les participants n'aient pas atteint une performance de 100 % au posttest, nous

croions que l'apprentissage des mots a peut-être été trop automatisé. Une autre stratégie pourrait être d'ajouter un moment de collecte des données intermédiaire, c'est-à-dire se situant entre le début et la fin des interventions, alors que l'apprentissage est possiblement davantage en construction et moins automatisé, ou peut-être même dès qu'il y a un début d'apprentissage.

Finalement, l'ajout d'une tâche permettant d'observer la mise en place du recyclage neuronal sur le plan spatial de manière plus précise nous semble nécessaire afin de pouvoir répondre de façon plus complète à la question de recherche. Nous croyons que cette tâche devrait permettre d'observer les effets de chacune des interventions sur l'organisation de la mosaïque ventrale, une partie du cerveau qui inclut différentes régions ventrales (c'est-à-dire situées sous le cerveau) du cortex visuel, dont les régions responsables de la reconnaissance des objets, des visages, des paysages, ainsi que des mots écrits. À cette fin, il existe déjà une tâche dans laquelle il est demandé aux participants de simplement regarder différentes catégories d'objets (maisons, outils, visages, damiers, mots écrits) qui sont présentés à l'écran (Dehaene *et al.*, 2010; Monzalvo *et al.*, 2012). Cette tâche permet d'étudier avec plus de précision la mise en place du recyclage neuronal, en observant le déplacement et la réorganisation de l'activité cérébrale dans les régions ventrales du cortex visuel, à la suite de l'apprentissage de la lecture de mots. En effet, tel que détaillé dans le cadre théorique, la théorie du recyclage neuronal propose que l'apprentissage de la lecture nécessite de recycler les circuits neuronaux d'une région spécifique du cortex visuel qui, à la base, est spécialisée dans la reconnaissance des objets, des visages, des animaux, etc. (Dehaene *et al.*, 2010; Szwed, Ventura, Querido, Cohen et Dehaene, 2012) afin que celle-ci devienne spécialisée dans la reconnaissance des mots écrits. À la suite de l'apprentissage de la lecture, cette région réagit d'ailleurs beaucoup plus fortement à la présentation de lettres et de mots qu'à la présentation d'autres types de stimuli comme des outils ou des visages (Pegado *et al.*, 2014). La tâche dont il est ici question a déjà été utilisée dans le cadre de

plusieurs études en neuroimagerie et a permis de déterminer que l'apprentissage de la lecture induit en effet une réorganisation de l'activité cérébrale dans la partie de la mosaïque ventrale du cerveau. Une première recherche a ainsi montré qu'au fur et à mesure que la compétence en lecture augmente, l'activité cérébrale dans la région occipito-temporale gauche décroît lors de l'observation de visages et augmente lors de l'observation de mots écrits; en parallèle, l'activité cérébrale en réponse à l'observation de visages augmente dans la même région de l'hémisphère droit du cerveau (Dehaene *et al.*, 2010). Une autre étude a permis d'observer que dès la première année d'école, des enfants qui ont appris à lire montrent une réponse spécifique aux mots écrits par rapport à d'autres stimuli visuels tels que des images de maisons ou de damiers ainsi qu'une activité plus faible dans l'hémisphère gauche et nettement plus étendue dans l'hémisphère droit pour les visages (Monzalvo *et al.*, 2012). Dans le cadre de cette même étude, la tâche a également été utilisée dans le but de mettre en évidence les différences dans l'organisation de la mosaïque ventrale entre des élèves dyslexiques et non dyslexiques (Monzalvo *et al.*, 2012). L'utilisation de cette tâche cognitive permettrait donc de répondre avec plus de précision à l'objectif de cette recherche puisqu'elle permettrait d'observer les effets respectifs de deux approches d'enseignement sur la mise en place du recyclage neuronal, en étudiant non seulement la spécialisation de la région occipito-temporale gauche durant la lecture de mots (comme le fait la tâche de lecture de mots qui a été utilisée), mais également la réorganisation de l'activité cérébrale associée à l'observation de différents stimuli visuels dans les autres régions de la mosaïque ventrale, réorganisation qui s'établit en parallèle à la spécialisation de la région OTG. Il nous apparaît également avantageux d'un point de vue pratique de faire l'ajout d'une tâche cognitive dont les paramètres ont déjà été validés dans le cadre de plusieurs recherches, limitant ainsi le risque de biais inhérents au design d'une nouvelle tâche utilisable en neuroimagerie.

5.7.2 Perspectives de recherches complémentaires

Dans la lignée de ce projet, nous croyons qu'il serait également intéressant de chercher à vérifier si des interventions pédagogiques distinctes peuvent être associées à des modifications au niveau de la structure de certaines régions cérébrales impliquées dans l'apprentissage de la lecture. Des recherches ont en effet montré que certains apprentissages sont associés à des changements de nature structurelle (Maguire, Spiers, Good, Hartley, Frackowiak et Burgess, 2000; Draganski, Gaser, Busch, Schuierer, Bogdahn et May, 2004; Kwok *et al.*, 2011), mais à notre connaissance, aucune recherche n'a permis d'observer de changements anatomiques à la suite d'interventions ciblées, en contexte d'apprentissage de la lecture.

À l'inverse, dans l'optique de mieux comprendre comment l'architecture initiale du cerveau peut moduler la façon dont se réalisent certains apprentissages, il pourrait aussi être intéressant d'explorer la relation entre l'enseignement et la structure cérébrale du cerveau avant l'apprentissage. Des recherches récentes indiquent en ce sens que la morphologie du sillon temporal occipital pourrait permettre de prédire les capacités de lecture chez les enfants (Borst, Cachia, Tissier, Ahr, Simon et Houdé, 2016) et les adultes (Cachia *et al.*, 2017). Plus précisément, il a été observé que les enfants et les adultes qui avaient un sillon temporal occipital gauche interrompu présentaient de meilleures capacités de lecture que les adultes qui avaient un sillon continu. Il semble donc que certaines contraintes neurodéveloppementales, à savoir la morphologie sulcale, pourraient interagir avec des facteurs environnementaux tels que les interventions pédagogiques mises en place, lors de l'apprentissage de la lecture. Cela pourrait contribuer à expliquer pourquoi certains élèves présentent un meilleur gain de performance à la suite d'interventions visant l'apprentissage de la lecture. Dans le cadre de notre projet, nous avons d'ailleurs constaté qu'il existe une grande variabilité au niveau du gain de performance parmi les élèves ayant pris part aux interventions : tous

ne présentent donc pas la même réceptivité à l'intervention. Par exemple, bien que les élèves montrent en moyenne un gain performance de 24 % à la suite de l'intervention phonologique pour les mots entraînés, l'écart-type associé à ce gain semble relativement élevé (17 %). Cela laisse entendre que bien que les élèves se soient en moyenne améliorés significativement suite à cette intervention, plusieurs d'entre eux ne présentent qu'un très faible gain de performance. Il devient donc nécessaire de s'interroger sur les raisons pour lesquelles certains élèves présentent une grande amélioration, alors que d'autres ont peu progressé, considérant que le niveau initial des habiletés de lecture des élèves a été contrôlé et qu'ils ont pourtant tous pris part à la même intervention pédagogique. En ce sens, la morphologie sulcale semble être une piste intéressante à explorer, car une meilleure compréhension des contraintes cérébrales individuelles associées à la lecture de mots pourrait ultimement permettre de développer des interventions pédagogiques mieux adaptées aux particularités cérébrales uniques de certains élèves et de mieux différencier l'enseignement.

Par ailleurs, compte tenu des connexions qui s'établissent entre différentes régions cérébrales lors de l'apprentissage de la lecture, il apparaît également intéressant de réfléchir à la conduite de projets visant à mesurer la connectivité fonctionnelle. En effet, des analyses de type PPI (*psychophysiological interaction*, Friston, Buechel, Fink, Morris, Rolls et Dolan, 1997; O'Reilly, Woolrich, Behrens, Smith et Johansen-Berg, 2012) permettraient d'observer la connectivité entre différentes régions cérébrales d'intérêt à la suite d'interventions en lecture, en évaluant les corrélations entre les variations du signal *BOLD* au sein de ces régions, lors de la lecture des mots. Il s'agirait donc d'une autre façon de mesurer l'impact d'interventions pédagogiques en lecture sur le cerveau.

Finalement, ce projet visait à répondre à une question assez fondamentale, à savoir si l'enseignement peut influencer le fonctionnement cérébral, et plus spécifiquement la

mise en place du recyclage neuronal. Cette question a été étudiée dans le contexte spécifique d'un apprentissage nécessitant du recyclage neuronal, qui est le mieux documenté à ce jour : celui de la lecture. Or, afin d'être en mesure de répondre plus solidement à cette question, l'une des prochaines étapes devrait être de mener un projet semblable dans le contexte d'autres apprentissages scolaires nécessitant du recyclage neuronal, tel que celui de l'arithmétique. Cela permettrait en effet d'appréhender la question de manière plus générale, à partir de résultats obtenus pour différents contextes d'apprentissage, ce qui permettrait une réflexion pédagogique dont la portée serait plus grande. Ce projet de thèse ne peut en effet prétendre à lui seul fournir une réponse à une question de recherche d'aussi grande envergure.

CONCLUSION

« Le cerveau a besoin de l'éducation, mais ne l'attend pas pour démarrer. » (Olivier Houdé)

Cette recherche avait pour objectif général de vérifier si la prise en compte des contraintes cérébrales dans le choix des approches d'enseignement qui sont mises en place auprès des élèves peut avoir une incidence sur l'apprentissage et sur les modifications cérébrales qui découlent de cet apprentissage. Le contexte de l'apprentissage de la lecture a été sélectionné pour ce projet puisqu'il s'agit de l'apprentissage scolaire nécessitant du recyclage neuronal pour lequel les mécanismes cérébraux sont à ce jour les mieux documentés et connus. La technologie de l'IRMf a été utilisée afin de voir si des interventions pédagogiques distinctes visant l'apprentissage de la lecture de mots pouvaient avoir un impact différent sur le fonctionnement cérébral et plus précisément sur la spécialisation de la région occipito-temporale gauche centrale au processus de recyclage neuronal, auprès de lecteurs n'ayant pas encore débuté leur apprentissage formel de la lecture.

À cette fin, nous avons élaboré un devis de recherche dans lequel deux groupes d'élèves de niveau préscolaire qui ne savaient pas lire ont chacun pris part à une intervention différente dont l'objectif était d'apprendre à lire une liste constituée de 20 mots. Dans la lignée de recherches antérieures (Yoncheva *et al.*, 2010; 2015), ces interventions se différenciaient quant à l'unité d'analyse du mot sur laquelle l'attention du participant était dirigée : l'intervention phonologique dirigeait l'attention de l'élève vers les correspondances graphèmes-phonèmes et l'intervention globale dirigeait leur attention vers la forme entière du mot. Le devis de recherche incluait une prise de mesure en

prétest et en posttest. Les données collectées étaient de nature comportementale (évaluation des habiletés de lecture en prétest et mesure de la performance à une tâche cognitive de lecture de mots en prétest et posttest) ainsi que cérébrale (mesure de l'activité cérébrale en prétest et en posttest). Des images de l'activité cérébrale des participants ont été prises alors qu'ils réalisaient la tâche de lecture de mots dans l'appareil d'IRMf. Notre hypothèse était qu'une intervention pédagogique dirigeant l'attention de l'élève vers les correspondances graphèmes-phonèmes aurait pour effet de faciliter davantage le recyclage neuronal de la région occipito-temporale gauche, comparativement à une intervention orientant l'attention vers la forme entière du mot. Cela se refléterait par une plus grande activation de cette région cérébrale à la suite de l'intervention chez les participants du groupe phonologique, comparativement au groupe global, ce qui représenterait possiblement une amorce de recyclage neuronal plus importante.

Les principaux résultats de recherche obtenus indiquent d'abord que, sur le plan de la performance à la tâche en lecture, les deux interventions ont mené à une amélioration significative pour les mots entraînés. Or, l'intervention phonologique est associée à une amélioration significativement plus grande de la performance que l'intervention globale pour les mots nouveaux. Sur le plan cérébral, les résultats permettent de fournir de premiers éléments de réponse à la question de recherche, puisqu'il semble que les deux interventions pédagogiques influencent différemment le fonctionnement cérébral et, possiblement, la mise en place du recyclage neuronal. Or, de façon surprenante, ce sont les participants du groupe global qui présentent une activité cérébrale significativement plus importante dans une région de l'hémisphère gauche située à la frontière du cortex occipito-temporal et du cortex extrastrié en posttest, comparativement au prétest, lors de la lecture des mots nouveaux. Aucune différence significative d'activité cérébrale n'est observée pour les mots entraînés, lorsque l'on compare les deux moments de

mesure entre les deux groupes. Ces résultats cérébraux sont inattendus, car ils vont a priori en sens inverse de ce qui avait été anticipé.

À la lumière de nos résultats comportementaux et cérébraux ainsi que des résultats de recherches antérieures (Bitan *et al.*, 2005; Brem *et al.*, 2010, van de Walle de Ghelcke *et al.*, 2020; Xue *et al.*, 2006; Yoncheva *et al.*, 2010; 2015) nous émettons l'hypothèse explicative que la différence d'activité cérébrale observée en faveur du groupe global serait possiblement le reflet d'un début d'apprentissage des correspondances graphèmes-phonèmes que les participants auraient découvert de manière implicite à force d'être exposés de manière répétée aux mots écrits dans le cadre de l'intervention. Dans le contexte de la lecture des mots nouveaux, les participants du groupe global auraient donc possiblement recours à cette stratégie précaire de décodage afin de tenter de lire les mots, ce qui les amènerait à porter une grande attention aux lettres des mots présentés dans la tâche ainsi qu'à leur correspondance phonologique. Cela se reflèterait par une activation plus grande dans la région du cortex occipito-temporal/extrastrié gauche.

D'un point de vue pédagogique, ces résultats pointent vers l'idée qu'il apparaît pertinent de chercher à maximiser l'exposition aux mots écrits en début d'apprentissage de la lecture, car le cerveau semble être en mesure, à force de répétition et de manière relativement autonome, de détecter certaines régularités dans les mots écrits et de créer des associations entre les lettres et les sons. Une fréquence de contact élevée avec les mots écrits représenterait donc autant d'opportunités pour le cerveau de mener ce processus d'apprentissage statistique qui pourrait possiblement contribuer de manière très graduelle au développement d'habiletés de lecture. Par ailleurs, les résultats comportementaux de cette étude laissent aussi entrevoir que cette exposition seule ne semble pas être suffisante pour que l'enfant parvienne à automatiser les correspondances graphèmes-phonèmes et à lire de façon autonome des mots qui ne lui

auraient pas été enseignés. Un enseignement explicite et systématique de la relation entre les lettres et les sons semble en ce sens permettre d'automatiser davantage les correspondances graphèmes-phonèmes et de lire correctement et de manière plus autonome des mots nouveaux. De façon générale, les résultats mettent donc en lumière le rôle important de l'éducation dans l'apprentissage de la lecture, qui apparaît essentiel même si le cerveau semble capable de procéder à une certaine forme d'apprentissage statistique de manière autonome, à force d'exposition aux mots écrits ainsi qu'à leur prononciation.

D'un point de vue pratique, les résultats de ce projet mettent de nouveau en relief la complexité de mener des projets de recherche en neuroéducation impliquant la participation de jeunes enfants (Vogel, Matejko et Ansari, 2016). En effet, la difficulté des enfants à demeurer immobiles durant la séance d'IRMf a conduit à une perte relativement importante de données dans le cadre de ce projet. Nous croyons que cela a nui à l'obtention d'une puissance statistique suffisante, ce qui représente à notre sens la principale limite de cette recherche. Nous pensons néanmoins que les projets menés auprès de cette jeune population demeurent importants et nécessaires puisque certaines spécificités du cerveau en développement ne peuvent être observées que chez les enfants (Wilke, Holland, Myseros, Schmithorst et Ball, 2003). Plusieurs chercheurs sont aussi d'avis qu'il reste encore beaucoup à découvrir sur le développement et la maturation des systèmes cérébraux fonctionnels (Ansari *et al.*, 2012). La participation de jeunes enfants à des projets de recherche en neuroéducation pourrait en ce sens permettre de mieux comprendre l'origine neurale de certains troubles d'apprentissage (Bookheimer, 2000) ou encore la trajectoire développementale de différents apprentissages scolaires. Il semble également important de chercher à mieux documenter les effets distincts d'interventions ou expériences éducatives sur le fonctionnement du cerveau à un jeune âge, d'autant plus que de nombreuses études ont montré que les expériences éducatives précoces peuvent avoir un impact important sur

le développement du cerveau, ainsi que sur l'apprentissage, le comportement et même la santé (McDermott *et al.*, 2018; Shonkoff et Levitt, 2010; Wade, Fox, Zeanah et Nelson, 2019). Ces éléments indiquent en ce sens qu'il semble nécessaire de continuer à réfléchir à des stratégies permettant de faciliter la conduite de projets auprès de jeunes enfants.

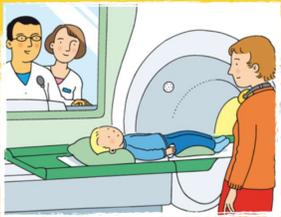
Cette recherche représente à notre sens une humble contribution à l'étude de la relation entre l'enseignement et le recyclage neuronal, dans le contexte de l'apprentissage de la lecture de mots. Elle nous a permis de mettre à l'essai pour la première fois un devis de recherche visant à mesurer les effets d'interventions éducatives sur le plan cérébral, en utilisant la technologie de l'IRMf auprès de jeunes enfants, ce qui pourra assurément nous aider à préciser certains choix méthodologiques dans le cadre de recherches ultérieures. Nous croyons d'ailleurs que les prochains projets de recherche visant à étudier les effets d'interventions pédagogiques sur le fonctionnement cérébral et la mise en place du recyclage neuronal devraient inclure une mesure plus précise et complète du recyclage neuronal et devraient prévoir un moment de collecte des données plus tôt dans le processus d'apprentissage, ce qui permettrait possiblement de mieux capturer et distinguer les effets respectifs des interventions. Des recherches portant sur les effets d'interventions pédagogiques pour d'autres apprentissages scolaires nécessitant du recyclage neuronal favoriseraient également une réflexion plus vaste sur la prise en compte des contraintes cérébrales dans l'enseignement.

ANNEXE A

DOCUMENTS UTILISÉS LORS DU RECRUTEMENT

1. Livret d'informations destiné à l'enfant

Aide-nous à comprendre comment ton cerveau apprend à lire!



© SH / Association SPARADRAP



Deviens un explorateur et participe à une recherche sur le cerveau!



Bonjour!

Si tu es d'accord, on va réaliser ensemble une recherche scientifique sur ce qu'il y a dans ta tête : ton cerveau!

Tu pourras nous aider à mieux comprendre comment il grandit et comment il apprend.



Grâce à toi, on pourra en savoir plus sur le cerveau des enfants! On va t'expliquer comment fonctionne notre recherche et te dire comment tu pourrais nous aider.

Es-tu prêt?

Dépliant approuvé le 20 avril 2015 par le Comité mixte d'éthique de la recherche du PNC dans le cadre du projet CMEP-RVQ 15-16-02.

Savais-tu que?

Il y a plusieurs façons de voir ce qui se passe dans ton corps.

On peut observer le corps de l'extérieur, mais aussi de l'intérieur. Regarde les images suivantes :

On peut mesurer mon corps



1



2

... et même voir à l'intérieur !

Image du LaPsyDÉ, CNRS, France (O. Houde)

Qu'y a-t-il dans ta tête?

Dans ta tête, il y a ton cerveau.

C'est lui qui contrôle les mouvements de ton corps et ta pensée. On peut voir ton cerveau à l'aide d'un appareil spécial qui ressemble un peu à un vaisseau spatial!



Le cerveau



3



4



Ce vaisseau spatial a un bien drôle de nom: on l'appelle IRM!

Image du LaPsyDÉ, CNRS, France (O. Houde)

Comment ça se passe?

Pour prendre des images de ton cerveau, tu dois t'allonger dans le tunnel de l'appareil qui ressemble à un vaisseau spatial pendant environ 30 minutes en répondant à des questions et en restant le plus immobile possible, comme une statue!

1. À ton arrivée :

- Tu seras accueilli par l'équipe.
- Tu nous diras si tu es d'accord pour participer en coloriant l'une des deux images suivantes :

Pratique-toi si tu veux!



OUI



NON

- Tu te pratiqueras à jouer au jeu de la statue.
- On te fera entendre les bruits spéciaux de l'appareil.
- Tu apprendras comment appuyer sur les boutons d'une manette pour répondre à des questions, un peu comme dans un jeu vidéo.

Comment ça se passe?



Passer une IRM ne fait pas mal, car ce ne sont que des photos! Mais c'est un peu long et bruyant, et il ne faut pas bouger!

2. Pendant l'IRM:

- Tu seras installé confortablement sur un lit et on te donnera un casque comme celui d'un astronaute.
- Quand tout est prêt, le lit mobile entre tout doucement dans l'appareil pour que ta tête soit à peu près au milieu du tunnel.
- Grâce à un petit miroir, tu peux voir des images sur un écran d'ordinateur.
- On prendra plusieurs photos de ton cerveau. Parfois, tu n'auras rien à faire. À d'autres moments, on te demandera de regarder des images ou de lire des mots que nous aurons vus ensemble.



Comment ça se passe?

3. Après l'IRM:

- On te dira que c'est fini !
- Le lit sortira doucement du tunnel. Tu pourras bouger et te dégourdir les Jambes.
- Tu pourras rejoindre tes parents, prendre une collation et te reposer un peu.
- Avant que tu partes, on te posera quelques questions pour savoir comment tu as trouvé ton expérience.
- On te donnera un diplôme de petit chercheur et un chandail souvenir. 
- On enverra à tes parents une vraie image de TON cerveau. Tu pourras la garder en souvenir et la montrer à tes amis et ta famille!



LRN

LABORATOIRE DE RECHERCHE EN
NEUROÉDUCATION | LABORATORY FOR
RESEARCH IN NEUROEDUCATION

Mieux comprendre comment le cerveau apprend pour mieux enseigner!

À l'aide de l'imagerie par résonance magnétique (IRM), le Laboratoire de recherche en neuroéducation de l'Université du Québec à Montréal étudie les mécanismes cérébraux liés aux apprentissages scolaires et à l'enseignement.



Lorie-Mariène Brault Folsy est enseignante de formation, étudiante au doctorat en éducation à l'UQAM et coordonnatrice du projet de recherche.

Steve Masson est professeur à la Faculté des sciences de l'éducation de l'Université du Québec à Montréal (UQAM) et directeur du LRN.



Ce dépliant a été préparé par le LRN en collaboration avec le directeur du Laboratoire de psychologie du développement et de l'éducation de l'enfant (LaPsyDÉ), le professeur Olivier Houde de l'Université Paris-Descartes.



2. Dépliant destiné aux parents

Quels sont les avantages à participer à ce projet?

- La participation de votre enfant à cette étude lui permettra de mieux comprendre comment son cerveau fonctionne, grandit et apprend.
- Sa participation contribuera également à une meilleure compréhension des mécanismes cérébraux impliqués dans l'apprentissage et l'enseignement de la lecture. Cela pourrait ultimement permettre de mieux enseigner.

Une compensation financière sera offerte pour vos déplacements et votre participation.



Ce projet a reçu l'approbation du Comité mixte d'éthique de la recherche du Regroupement Neuroimagerie Québec (CMER-RNQ 15-16-03), un comité accrédité par le Ministère de la santé et des services sociaux.

Pour nous joindre: 514-987-3000 poste: 5502

Coordonnatrice:
brault-foisy.lorie-marlene@uqam.ca

Professeur responsable:
masson.steve@uqam.ca

LRN

LABORATOIRE DE RECHERCHE EN
NEUROÉDUCATION | LABORATORY FOR
RESEARCH IN NEUROEDUCATION

Mieux comprendre comment le cerveau apprend pour mieux enseigner!

À l'aide de l'imagerie par résonance magnétique (IRM), le Laboratoire de recherche en neuroéducation de l'Université du Québec à Montréal étudie les mécanismes cérébraux liés aux apprentissages scolaires et à l'enseignement.

Consultez la page web du projet :
<http://www.labneuroeducation.org/lecture>



Lorie-Marlene Brault Foisy est enseignante de formation, étudiante au doctorat en éducation à l'UQAM et coordonnatrice du projet de recherche.

Steve Masson est professeur à la Faculté des sciences de l'éducation de l'Université du Québec à Montréal (UQAM) et directeur du LRN.



Dépliant approuvé le 8 octobre 2015 par le Comité mixte d'éthique de la recherche du RNQ dans le cadre du projet CMER RNQ 15-16-03.

Votre enfant est en maternelle ?



Source: Wikipedia

Aidez-nous à mieux comprendre comment son cerveau apprend à lire!

LRN
LABORATOIRE DE RECHERCHE EN
NEUROÉDUCATION | LABORATORY FOR
RESEARCH IN NEUROEDUCATION

UNF
Unité de
neuroimagerie
fonctionnelle



Quel est l'objectif de la recherche?

Lorsque l'on apprend, le cerveau se transforme. Aujourd'hui, grâce à l'imagerie par résonance magnétique (IRM), il est possible d'étudier ces transformations lors de l'apprentissage.

La recherche que nous menons vise à mesurer les effets, au niveau cérébral, d'interventions pédagogiques en lecture qui sont actuellement utilisées dans les classes du Québec.

Quelles sont les étapes?

1. Évaluation en classe ou à la maison des habiletés en lecture de votre enfant.
2. Réalisation d'une première séance d'IRM à l'Unité de neuroimagerie fonctionnelle (UNF).
3. Réalisation en classe d'activités pédagogiques individualisées ayant pour but d'acquérir les bases de la lecture (4 séances de 20 minutes par semaine pour 5 semaines).
4. Réalisation d'une deuxième séance d'IRM.

Comment fonctionne l'IRM?

L'imagerie par résonance magnétique donne des images du corps, du cerveau ainsi que de leur fonctionnement.

Elle permet de voir les zones du cerveau qui deviennent actives lorsqu'on demande à une personne d'effectuer une tâche (ex: lire). Lors de la réalisation de la tâche, il y a une augmentation de l'arrivée du sang dans la partie du cerveau qui contrôle cette activité. L'arrivée du sang provoque alors un changement dans le signal émis par le cerveau et cette modification de signal peut être détectée par l'appareil.

Comment se déroule une séance d'IRMf?



Source: neurphilosophy.wordpress.com

1) Avant l'IRM

- Votre enfant et vous serez reçus par l'équipe (chercheurs et responsables de l'appareil).
- Nous vous ferons visiter les installations.
- Nous expliquerons à votre enfant toutes les étapes à suivre.
- Il s'exercera à rester immobile dans un simulateur.
- Il fera des activités sur un ordinateur, sous forme de jeux, dans lesquelles on lui demandera d'essayer de lire des mots.
- Nous lui montrerons le casque qui sert à prendre les images et nous lui ferons entendre les bruits qu'émet l'appareil.

2) Dans l'IRM

- Une technicienne en radiologie et un autre membre de l'équipe aideront votre enfant à s'installer confortablement dans l'appareil.
- Il aura des écouteurs pour diminuer le bruit de l'appareil et pour communiquer avec le chercheur.
- Nous placerons des coussins et une couverture pour qu'il soit plus confortable.
- Il pourra voir l'écran d'ordinateur sur un petit miroir.
- Il répondra à des questions en lecture à l'aide d'une manette.

3) Après l'IRM

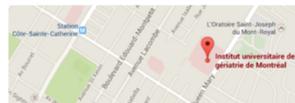
- Votre enfant recevra un diplôme officiel de petit chercheur ainsi qu'un chandail souvenir.
- Votre enfant recevra aussi une image de **SON** cerveau.



** Il faut prévoir environ 2 heures par visite à l'UNF **

La participation de votre enfant à cette étude ne lui fera courir aucun risque, sur le plan médical, s'il ne présente aucune contre-indication. L'IRM est couramment utilisé dans le milieu de la santé depuis plusieurs années.

Où se situe l'appareil d'IRM?



UNF
Unité de
neuroimagerie
fonctionnelle

4565 Chemin Queen-Mary,
Montréal, QC, H3W 1W5

3. Coupon-réponse

Participation à une recherche sur le cerveau !



Chers parents,

Votre enfant a participé à un atelier ludique sur le cerveau qui a eu lieu en classe aujourd'hui.

Dans le cadre de cet atelier, nous lui avons parlé de la façon dont son cerveau fonctionne, grandit et apprend. Nous lui avons également présenté le projet de recherche que nous menons actuellement et qui vise à mieux comprendre comment le cerveau apprend à lire.

Vous trouverez plus d'informations au sujet de ce projet de recherche dans les documents qui accompagnent cette lettre. Nous vous invitons à prendre connaissance du dépliant qui décrit le projet et à lire avec votre enfant le livret qui lui est destiné. Vous pouvez également consulter la page web du projet à l'adresse suivante: www.labneuroeducation.org/lecture

Vous pourrez ensuite remplir le coupon-réponse ci-dessous afin de nous indiquer si vous êtes intéressés à participer. Nous communiquerons alors avec vous par téléphone pour la suite du projet.

COUPON-RÉPONSE

Je serais intéressé à participer à cette recherche avec mon enfant et j'aimerais obtenir plus d'informations.

Oui Non

Nom de l'enfant: _____

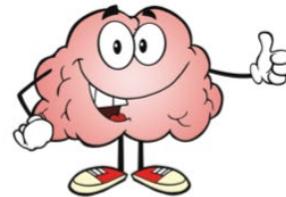
Date de naissance: _____

Mon enfant est: Gaucher Droitier Je ne sais pas

Nom du parent: _____

Courriel: _____

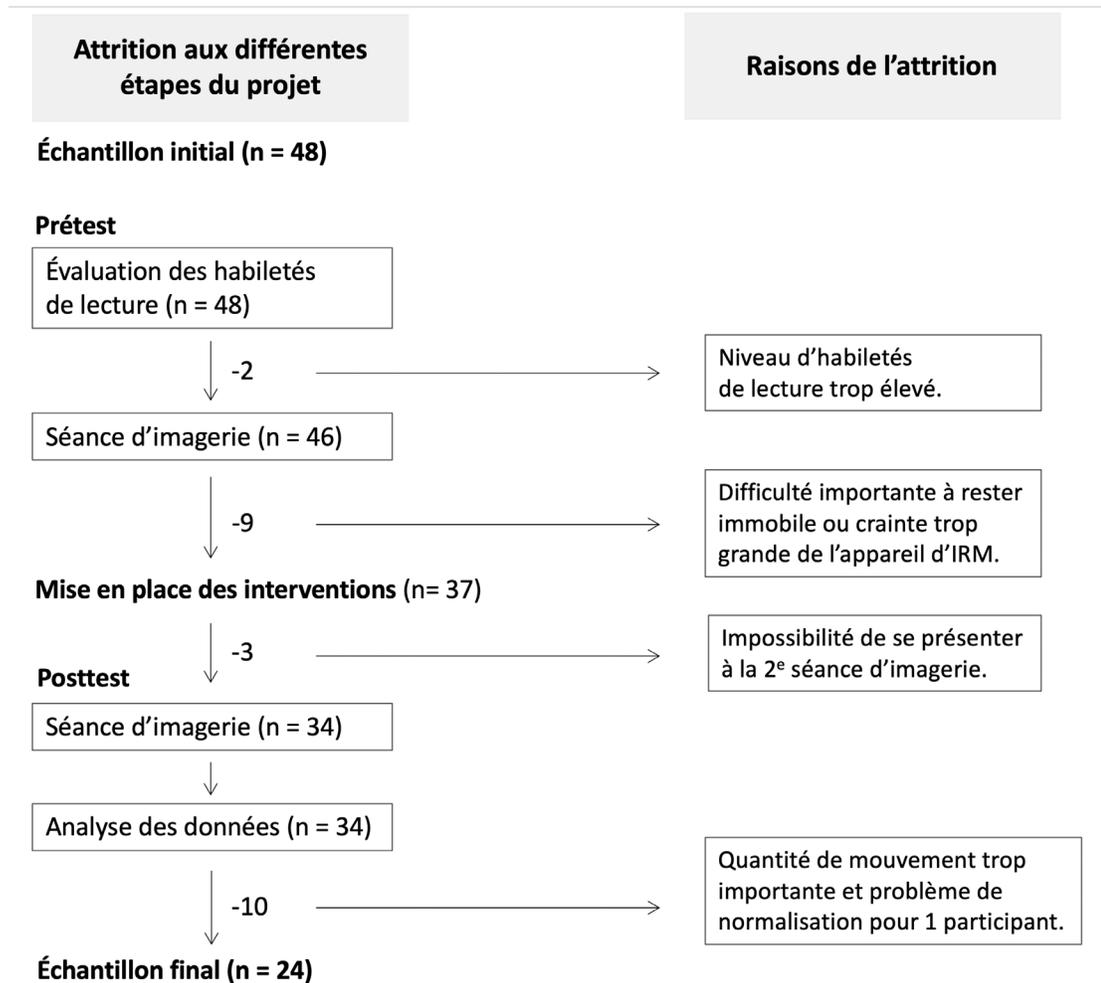
Téléphone: _____



Document approuvé le 20 novembre 2015 par le Comité mixte d'éthique de la recherche du RNQ dans le cadre du projet CMER RNQ 15-16-03.

ANNEXE B

REPRÉSENTATION DE L'ATTRITION EXPÉRIMENTALE AUX DIFFÉRENTES ÉTAPES DU PROJET DE RECHERCHE



ANNEXE C
LISTE DES MOTS ENSEIGNÉS DANS LE CADRE DES
INTERVENTIONS A ET B

- | | |
|-----------|------------|
| 1. bol | 11. bulle |
| 2. lac | 12. lutin |
| 3. vis | 13. patte |
| 4. bébé | 14. pomme |
| 5. café | 15. sapin |
| 6. cape | 16. tasse |
| 7. lire | 17. banane |
| 8. moto | 18. lavabo |
| 9. robe | 19. patate |
| 10. avion | 20. melon |

ANNEXE D

PLANIFICATION TEMPORELLE DES INTERVENTIONS

Planification de l'intervention A

	P1	P2	P3	P4
Semaine 1	a, p Mot exemple : papa	<i>Revoir P1</i> e, t patate patte	<i>Revoir P2</i> c cape	<i>Revoir P3</i> Mini-test a, p, e, t, c patate patte cape
Semaine 2	l, o lac	<i>Revoir P1</i> b, u bol bulle	<i>Revoir P2</i> m, r moto pomme robe	<i>Revoir P3</i> Mini-test l, o, b, u, m, r lac bol bulle moto pomme robe
Semaine 3	Révision des semaines 1 et 2	n, s tasse banane	<i>Revoir P2</i> i, v vis lavabo lire	<i>Revoir P3</i> Mini-test n, s, i, v tasse banane vis lavabo lire
Semaine 4	in sapin lutin	<i>Revoir P1</i> é, f bébé café	<i>Revoir P2</i> on melon avion	<i>Revoir P3</i> Mini-test in, é, f, on bébé café melon avion sapin lutin
Semaine 5	Révision des semaines 3 et 4	Révision toute la matière 1	Révision toute la matière 2	Mini-test Révision toute la matière

Planification de l'intervention B

	P1	P2	P3	P4
Semaine 1	Mot exemple: papa	<i>Revoir P1</i> patate patte	<i>Revoir P2</i> cape	<i>Revoir P3</i> Mini-test patate patte cape
Semaine 2	lac	<i>Revoir P1</i> bol bulle	<i>Revoir P2</i> moto pomme robe	<i>Revoir P3</i> Mini-test lac bol bulle moto pomme robe
Semaine 3	Révision des semaines 1 et 2	tasse banane	<i>Revoir P2</i> vis lavabo lire	<i>Revoir P3</i> Mini-test tasse banane vis lavabo lire
Semaine 4	sapin lutin	<i>Revoir P1</i> bébé café	<i>Revoir P2</i> melon avion	<i>Revoir P3</i> Mini-test bébé café melon avion sapin lutin
Semaine 5	Révision des semaines 3 et 4	Révision toute la matière 1	Révision toute la matière 2	Mini-test Révision toute la matière

ANNEXE E
PARAMÈTRES D'ACQUISITION DES IMAGES
FONCTIONNELLES ET ANATOMIQUES

Images fonctionnelles (T2*)	Appareil : Siemens Trio TIM 3,0 T Temps de répétition = 2,0 s Temps d'écho = 30 ms « Flip angle » : 90 degrés Taille des voxels : 3 mm x 3 mm x 3 mm Ordre d'acquisition : « interleaved » Orientation des tranches : « AC-PC line » (« anterior commissure - posterior commissure ») Nombre de tranches : 33 « Field of view » (FOY) : 192 mm Résolution dans le plan (matrice) : 64 x 64 Antenne de tête : 32 canaux Épaisseur des tranches : 3,0 mm Espace entre les tranches : 25 % (0,75 mm)
Images anatomiques (T1)	Appareil : Siemens Trio TIM 3,0 T Temps de répétition = 2,53 s Temps d'inversion = 900 ms (« inversion time ») Temps d'écho : echo 1 = 1,64 ms ; echo 2 = 3,5 ms ; echo 3 = 5,36 ms ; echo 4 = 7,22 ms ; echo 5 = 13,0 ms ; echo 6 = 15,0 ms « Flip angle » : 7 degrés Taille des voxels : 1,0 x 1,0 x 1,0 mm Ordre d'acquisition : « interleaved » Nombre de tranches : 176 « Field of view » : 256 mm Résolution dans le plan (matrice) : 256 x 256 Antenne de tête : 32 canaux

ANNEXE F

RÉPARTITION DES MOTS ENSEIGNÉS ET DES MOTS
NOUVEAUX DANS CHACUNE DES SÉRIES DE LA
TÂCHE D'APPARIEMENT

1. Répartition des mots enseignés

Série 1	Série 2	Série 3	Série 4
cape	banane	lavabo	pomme
avion	café	lutin	bol
patate	lac	tasse	sapin
robe	vis	patte	bébé
moto	bulle	lire	melon

2. Répartition des mots nouveaux

Série 1	Série 2	Série 3	Série 4
mur	balle	vélo	patin
lapin	tissu	pirate	sac
botte	tomate	rame	lion
carré	savon	télé	lune
cabane	rire	fil	nappe

ANNEXE G

FORMULAIRE DE DÉPISTAGE EN IRM



Formulaire
Dépistage pour étude en IRM

Nom		Prénom	
Date de naissance (aaaa/mm/jj):		Sexe :	F M
Grandeur :	_____ cm	Poids :	_____ kg
Chercheur (ou) Projet (ou) No éthique :			
Afin d'assurer la sécurité de toute personne accédant aux locaux de l'UNF, il est très important que ce questionnaire soit complété correctement. Toute information contenue dans ce document est traitée en toute confidentialité.			
1. Avez-vous déjà subi une opération ?			
	Non	Oui	Si oui, précisez le type de chirurgie et la date
Tête			
Thorax ou cœur			
Abdomen, pelvis			
Bras, mains			
Jambes, pieds			
Colonne vertébrale			
Yeux			
Autres			
2. Portez-vous ?			
	Non	Oui	
Stimulateur cardiaque ? Électrodes épicaudiques ?			
Clip pour anévrisme cérébral, Stent ?			
Filtre ou cathéter dans un vaisseau sanguin ?			
Prothèse valvulaire cardiaque ?			
Prothèse cochléaire ? Prothèse auditive ?			
Neurostimulateur, stimulateur électronique pour les os ?			
Corps étrangers métalliques (ex: balles, fragments d'obus, éclats métalliques) ?			
Pompe à insuline implantée ?			
Prothèse orthopédique (ex: clou, vis, plaque) ?			
Maquillage permanent ou tatouage(s) ?			
Perçage(s) ?			
Implant(s) magnétique(s) ou non magnétique(s) ?			
Diaphragme, stérilet ?			
Prothèse dentaire, couronne ou appareil orthodontique ?			
Implant(s) ou prothèse(s) oculaire(s) ?			
Système de distribution transdermique (ex: timbre de nitroglycérine) ?			
Autres:			

Nom	Prénom
-----	--------

	Non	Oui
3. Êtes-vous enceinte ou croyez-vous l'être ?		
4. Êtes-vous claustrophobe ?		
5. Avez-vous déjà été blessé(e) par un morceau de métal (ex: Accident de voiture, accident du travail, blessure de guerre, etc.) ? Si oui, veuillez préciser:		
6. Avez-vous subi un examen par résonance magnétique ?		
7. Avez-vous déjà été:		
Machiniste ?		
Soudeur ?		
Opérateur de machinerie lourde ?		
Travailleur de métal ?		
8. Souffrez-vous de problème respiratoire ou moteur ?		
<p>On m'a expliqué les procédures à suivre lors d'une session d'IRM. On m'a informé des mesures de sécurité à appliquer et on a répondu à toutes mes questions. Je certifie que les renseignements ci-dessus sont exacts au meilleur de mes connaissances et consens à participer à une étude d'IRM.</p>		

PARTICIPANT:		
_____	_____	_____
Lettres moulées	Signature	Date

CHERCHEUR / Étudiant / Assistant de recherche:		
_____	_____	_____
Lettres moulées	Signature	Date

Responsable de l'UNF ayant révisé le formulaire avec le participant:		
_____	_____	_____
Lettres moulées	Signature	Date

ANNEXE H
FORMULAIRE DE CONSENTEMENT

RNQ

COMITÉ MIXTE D'ÉTHIQUE DE LA RECHERCHE

FORMULAIRE D'INFORMATION ET DE CONSENTEMENT

Titre du projet de recherche :	Effet de l'enseignement sur les processus de recyclage neuronal de lecteurs novices.
Chercheur responsable du projet de recherche :	Steve Masson Ph. D., chercheur, Université du Québec à Montréal.
Membre du personnel de recherche:	Lorie-Marlène Brault Foisy, étudiante au doctorat à l'Université du Québec à Montréal.
Organisme subventionnaire:	Conseil de recherches en sciences humaines du Canada.

Préambule

Nous invitons votre enfant à participer à un projet de recherche en neuroimagerie. Cependant, avant d'accepter qu'il participe à ce projet et de signer ce formulaire d'information et de consentement, à titre de représentant légal, veuillez prendre le temps de lire, de comprendre et de considérer attentivement les renseignements qui suivent.

Ce formulaire peut contenir des mots que vous ne comprenez pas. Nous vous invitons à poser toutes les questions que vous jugerez utiles au chercheur responsable de ce projet de recherche ou à un membre de son personnel de recherche et à leur demander de vous expliquer tout mot ou renseignement qui n'est pas clair.

Nature et objectifs du projet de recherche

Ce projet vise à identifier les mécanismes cérébraux associés à l'apprentissage et à l'enseignement de la lecture. Les résultats de ce projet pourraient, à terme, mener à des pistes d'intervention susceptibles d'améliorer l'enseignement de la lecture.

Pour la réalisation de ce projet de recherche, nous comptons recruter 40 participants, garçons et filles, âgés de 4 à 6 ans, qui n'ont pas encore entamé leur apprentissage de la lecture de façon formelle.

Qu'est-ce qu'une imagerie par résonance magnétique (IRM)?

L'imagerie par résonance magnétique réalisée en recherche, donne des images du corps, du cerveau ainsi que de leur fonctionnement. L'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle permet, quant à elle, de voir les zones du cerveau qui deviennent actives lorsqu'on demande à une personne d'effectuer une tâche. En effet, lorsque la personne effectue la tâche demandée, il y a une augmentation de l'arrivée de sang dans la partie du cerveau qui contrôle cette activité. L'arrivée du sang provoque un changement dans le signal

émis par le cerveau et cette modification de signal peut être détectée par l'appareil. Pour la réalisation de ce projet de recherche, aucune substance ne sera injectée. Votre enfant sera allongé sur un matelas qui sera lentement glissé dans un grand tube. Le tube est ouvert aux deux extrémités. Un système d'interphone permet de communiquer avec le technologue au besoin. Pour le confort de votre enfant, nous lui demanderons de porter soit un casque d'écoute, soit des bouchons protecteurs qui seront installés dans ses oreilles, et ce, afin de diminuer les bruits importants qui sont émis par l'appareil. Pendant que l'appareil fonctionne, il est important de demeurer immobile. Pour ce faire, un coussinet sera placé autour de sa tête afin d'assurer son immobilité.

Déroulement du projet de recherche

Ce projet de recherche se déroulera à l'école de votre enfant et au Centre de recherche de l'IUGM.

I. Préparation avant la séance d'IRM.

Pour que votre enfant vive une expérience positive, trois activités lui seront proposées avant sa séance d'IRM. Ces activités ont pour objectif de préparer adéquatement votre enfant à sa séance d'IRM.

Premièrement, un atelier éducatif aura lieu en classe. Durant cet atelier, la coordonnatrice du projet de recherche présentera le projet aux enfants. Elle leur expliquera notamment comment il est possible de prendre des images de leur cerveau (avec l'IRM). Puis, elle leur fera réaliser quelques activités afin qu'ils se familiarisent avec l'environnement de l'IRM. Un « casque » en carton sera placé sur leur tête pour symboliser l'antenne IRM, un faux tunnel sera utilisé pour représenter le tunnel de l'appareil et les enfants s'exerceront au jeu de la statue dans le tunnel. La coordonnatrice répondra à toutes les questions des enfants.

Deuxièmement, lorsque la coordonnatrice du projet rencontrera votre enfant afin d'évaluer son niveau de lecture, celle-ci en profitera également pour faire de nouveau une préparation avec ce dernier en vue de la séance d'imagerie. Elle apportera le « casque » en carton ainsi que le tunnel, pratiquera de nouveau le jeu de la statue, rassurera votre enfant si ce dernier présente des inquiétudes et répondra à ses questions ainsi qu'aux vôtres.

Troisièmement, avant de réaliser la séance d'IRM, une séance de simulation aura lieu. Durant cette séance de simulation, votre enfant pourra de nouveau entrer dans le faux tunnel qu'aura apporté la coordonnatrice du projet, s'il en ressent le besoin. Puis, il entrera dans un appareil de simulation qui ressemble à un véritable appareil d'IRM. Votre enfant pratiquera la tâche à l'extérieur du simulateur, puis à l'intérieur du simulateur pour qu'il puisse se familiariser avec la manette de réponse et l'environnement de l'IRM. Nous vérifierons qu'il répond en bougeant le moins possible. Nous lui ferons également entendre les bruits de l'appareil. Du renforcement positif sous forme d'encouragements et de félicitations sera donné à l'enfant à chacune des étapes.

II. Réalisation de la séance d'IRM.

La participation de votre enfant à ce projet de recherche consistera à réaliser une première séance d'imagerie par résonance magnétique. Lors de cette séance, nous lui demanderons d'abord de regarder un court vidéo d'animation de type Walt Disney durant une dizaine de minutes afin que nous puissions prendre des images de son cerveau au repos.

Puis, nous lui demanderons de répondre à des questions de type oui/non à l'aide d'une boîte de réponse. Pour ce faire, il devra regarder des images ou lire de son mieux des mots

présentés sur un écran. Cette tâche sera d'une durée d'environ 15 minutes. Une autre tâche durant laquelle nous lui demanderons d'observer différentes images (damier, outil, visage, maison) sera également réalisée. Cette tâche prendra environ 10 minutes.

Durant ces deux tâches, des images du cerveau de votre enfant seront collectées afin de voir quelles sont les régions cérébrales qui sont mobilisées.

La durée totale de la séance d'imagerie sera d'environ 45 minutes. La durée totale de la visite à l'UNF pour cette première séance d'imagerie sera de deux heures, ce qui inclut le temps de préparation et d'attente (accueil, visite des lieux, période de pratique, etc.). Entre ces deux visites, votre enfant recevra des interventions individualisées en lecture à son école, à une fréquence de 4 séances de 20 minutes durant 5 semaines, pour un total d'environ 7 heures. Puis, à la suite de ces interventions, il réalisera une deuxième séance d'imagerie identique à la première (durée de 2 heures).

Certains tests permettant de mesurer le niveau de compétence en lecture seront réalisés de nouveau à la suite de la 2^e séance d'IRM.

Avantages associés au projet de recherche

Il se peut que votre enfant retire un bénéfice personnel de sa participation à ce projet de recherche, mais nous ne pouvons vous l'assurer. Par ailleurs, les résultats obtenus contribueront à l'avancement des connaissances scientifiques dans ce domaine de recherche.

Inconvénients associés au projet de recherche

Les conditions imposées par l'utilisation de l'imagerie par résonance magnétique réalisée en recherche peuvent entraîner un inconfort du fait de devoir rester immobile et un inconfort pourrait également être associé au bruit qui est généré par le fonctionnement de l'appareil. Votre enfant pourrait aussi ressentir un certain stress ou une sensation de claustrophobie. Une préparation adéquate sera faite avant la séance d'IRM (jeux dans un tunnel, séance de simulation, écoute des bruits de l'appareil) de façon à ce que votre enfant vive cette expérience de manière positive.

Risques associés au projet de recherche

Selon les connaissances actuelles, la participation de votre enfant à une imagerie par résonance magnétique réalisée en recherche ne lui fera courir aucun risque, sur le plan médical, s'il ne présente aucune contre-indication.

À cause de la puissance du champ magnétique émis par l'appareil, il est nécessaire de prendre certaines précautions. C'est pourquoi vous devez obligatoirement remplir un questionnaire détaillé afin de détecter toute contre-indication, par exemple, la présence d'un stimulateur cardiaque, d'un clip d'anévrisme, de prothèse métallique, de prothèse ou clip valvulaire cardiaque, de présence de métal dans l'œil ou sur le corps, de tatouage, de piercing, de broches dentaires ou si votre enfant souffre de claustrophobie. La vérification rigoureuse de la présence de contre-indication sera assumée par le technologue en fonction à l'UNF.

Découverte fortuite

Les images acquises lors de l'imagerie par résonance magnétique réalisée en recherche à l'Unité de neuroimagerie fonctionnelle du Centre de recherche de l'Institut universitaire de gériatrie de Montréal ne font pas l'objet d'un examen médical systématique par un médecin.

Cependant, elles peuvent mettre en évidence des problèmes jusque-là ignorés, c'est ce que l'on appelle une découverte fortuite. C'est pourquoi, en présence d'une particularité, le chercheur responsable du projet de recherche vous appellera.

Participation volontaire et possibilité de retrait

La participation de votre enfant à ce projet de recherche est volontaire. Vous êtes donc libre de refuser qu'il participe à ce projet. Vous pouvez également le retirer de ce projet à n'importe quel moment, sans avoir à donner de raisons, en faisant connaître votre décision au chercheur responsable de ce projet de recherche ou à l'un des membres de son personnel de recherche.

Le chercheur responsable du projet de recherche, le Comité mixte d'éthique de la recherche du RNQ peuvent mettre fin à la participation de votre enfant, sans votre consentement, si de nouvelles découvertes ou informations indiquent que sa participation au projet n'est plus dans son intérêt, s'il ne respecte pas les consignes du projet de recherche ou s'il existe des raisons administratives d'abandonner le projet.

Si vous le retirez ou s'il est retiré du projet, l'information déjà obtenue dans le cadre de ce projet sera conservée aussi longtemps que nécessaire pour se conformer aux exigences réglementaires. Toute nouvelle connaissance acquise durant le déroulement du projet qui pourrait affecter votre décision de permettre à votre enfant de continuer à participer à ce projet vous sera communiquée sans délai verbalement et par écrit.

Confidentialité

Durant la participation de votre enfant à ce projet, le chercheur responsable de ce projet de recherche ainsi que les membres de son personnel de recherche recueilleront, dans un dossier de recherche, les renseignements le concernant. Seuls les renseignements nécessaires pour répondre aux objectifs scientifiques de ce projet seront recueillis.

Ces renseignements peuvent comprendre les résultats de tous les tests visant à évaluer le niveau de performance en lecture, le test de latéralité et les résultats liés à la collecte de données en neuroimagerie. Son dossier peut aussi comprendre d'autres renseignements tels que son nom et votre nom, son sexe, sa date de naissance et son école.

Tous les renseignements recueillis demeureront confidentiels dans les limites prévues par la loi. Afin de préserver son identité et la confidentialité des renseignements, il ne sera identifié que par un numéro de code. La clé du code reliant son nom à son dossier de recherche sera conservée par le chercheur responsable de ce projet de recherche.

Le chercheur responsable de ce projet de recherche utilisera les données à des fins de recherche dans le but de répondre aux objectifs scientifiques du projet décrits dans le formulaire d'information et de consentement.

Les données de recherche pourront être partagées avec les autres chercheurs participants à ce projet. Ce transfert d'information implique que ses données pourraient être transmises dans d'autres pays que le Canada. Cependant, le chercheur responsable de ce projet de recherche respectera les règles de confidentialité en vigueur au Québec et au Canada, et ce, dans tous les pays

Les données de recherche pourront être publiées dans des revues spécialisées ou faire l'objet de discussions scientifiques, mais il ne sera pas possible d'identifier votre enfant. Également, les données de recherche pourraient servir pour d'autres analyses de données reliées au projet ou pour l'élaboration de projets de recherche futurs. Par ailleurs, ses renseignements personnels, tels que son nom ou ses coordonnées, seront conservés

pendant 5 ans après la fin du projet par le chercheur responsable de ce projet de recherche et seront détruits par la suite.

À des fins de surveillance et de contrôle, le dossier de recherche de votre enfant pourra être consulté par une personne mandatée par le Comité mixte d'éthique de la recherche du RNQ ou par l'établissement ou par une personne mandatée par des organismes publics autorisés. Toutes ces personnes et ces organismes adhèrent à une politique de confidentialité.

À des fins de protection, notamment afin de pouvoir communiquer avec vous rapidement, le nom et prénom de votre enfant, vos coordonnées et la date de début et de fin de sa participation au projet seront conservés pendant un an après la fin du projet dans un répertoire à part maintenu par le chercheur responsable de ce projet de recherche.

Vous avez le droit de consulter le dossier de recherche de votre enfant pour vérifier les renseignements recueillis et les faire rectifier au besoin, et ce, aussi longtemps que le chercheur responsable de ce projet de recherche détient ces informations.

Études ultérieures

Acceptez-vous que les données de recherche de votre enfant soient utilisées pour réaliser d'autres projets de recherche soit dans le domaine de la neuroscience du vieillissement ou soit dans le domaine de la promotion de la santé, des soins et des interventions?

Ces projets de recherche seront évalués et approuvés par le Comité mixte d'éthique de la recherche du RNQ avant leur réalisation. Les données de recherche de votre enfant seront conservées de façon sécuritaire dans la Banque de données du Centre de recherche de l'IUGM, et ce, conformément à la politique de gestion de la Banque de données du Centre de recherche de l'IUGM. Afin de préserver son identité et la confidentialité de ses données de recherche, il ne sera identifié que par un numéro de code.

Ses données de recherche seront conservées aussi longtemps qu'elles peuvent avoir une utilité pour l'avancement des connaissances scientifiques. Lorsqu'elles n'auront plus d'utilité, ses données de recherche seront détruites. Par ailleurs, notez qu'en tout temps, vous pouvez demander la destruction des données de recherche de votre enfant en vous adressant au chercheur responsable de ce projet de recherche.

Acceptez-vous que les données de recherche de votre enfant soient utilisées à ces conditions? **Oui** **Non**

Participation à des études ultérieures

Acceptez-vous que le chercheur responsable du projet ou un membre de son équipe de recherche reprenne contact avec vous pour proposer à votre enfant de participer à d'autres projets de recherche? Bien sûr, lors de cet appel, vous serez libre d'accepter ou de refuser que votre enfant participe aux projets de recherche proposés. **Oui** **Non**

Compensation

Vous recevrez un montant de 40 dollars par visite pour un total de 80 dollars, et ce, en guise de compensation pour vos déplacements et pour la participation de votre enfant aux 2 IRM. Vous recevrez également une image du cerveau de votre enfant par courriel ainsi qu'un chandail souvenir pour votre enfant.

Indemnisation en cas de préjudice et droits du sujet de recherche

Si votre enfant devait subir quelque préjudice que ce soit dû à sa participation au projet de

recherche, il recevra tous les soins et services requis par son état de santé, sans frais de votre part.

En acceptant que votre enfant participe à ce projet de recherche, vous ne renoncez à aucun de ses droits ni ne libérez le chercheur responsable de ce projet de recherche et l'établissement de leur responsabilité civile et professionnelle.

Procédures en cas d'urgence médicale

Veillez noter que l'Institut universitaire de gériatrie de Montréal n'est pas un centre hospitalier de soins de courte durée qui offre des services d'urgence et qui compte sur la présence sur place d'un médecin 24 heures sur 24. Par conséquent, advenant une condition médicale qui nécessiterait des soins immédiats, les premiers soins lui seront dispensés par le personnel en place et des dispositions seront prises afin de le transférer, si nécessaire, aux urgences d'un hôpital avoisinant.

Identification des personnes-ressources

Si vous avez des questions concernant le projet de recherche ou si votre enfant éprouve un problème que vous croyez relié à sa participation au projet de recherche, vous pouvez communiquer avec le chercheur responsable du projet de recherche, Steve Masson, au numéro suivant : (514) 987-3000, poste 5502.

Pour toute question concernant les droits de votre enfant en tant que sujet participant à ce projet de recherche ou si vous avez des plaintes ou des commentaires à formuler, vous pouvez communiquer avec le commissaire local aux plaintes et à la qualité des services de l'IUGM, au numéro suivant : (514) 340-2109.

Surveillance des aspects éthiques du projet de recherche

Le Comité mixte d'éthique de la recherche du RNQ a approuvé ce projet de recherche et en assure le suivi. De plus, il approuvera au préalable toute révision et toute modification apportée au protocole de recherche et au formulaire d'information et de consentement. Pour toute information, vous pouvez joindre le secrétariat du Comité, par téléphone au (514) 340.2800, poste 3250 ou par courriel à l'adresse suivante: karima.bekhiti.iugm@ssss.gouv.qc.ca

Consentement

Titre du projet de recherche : Effet de l'enseignement sur les processus de recyclage neuronal de lecteurs novices.

1. Consentement du représentant légal

En ma qualité de représentant légal, j'ai pris connaissance du formulaire d'information et de consentement. Je reconnais qu'on m'a expliqué le projet, qu'on a répondu à mes questions et qu'on m'a laissé le temps voulu pour prendre une décision.

Après réflexion, je consens à ce que mon enfant participe à ce projet de recherche aux conditions qui y sont énoncées.

Nom de l'enfant mineur

Assentiment écrit de l'enfant capable de comprendre la nature du projet

Assentiment verbal de l'enfant incapable de signer son nom, mais capable de comprendre la nature de ce projet : **Oui** **Non**

Signature du représentant légal à savoir soit le parent soit le tuteur.

Date

2. Signature de la personne qui a obtenu le consentement si différent du chercheur responsable du projet de recherche

J'ai expliqué au représentant légal les termes du présent formulaire d'information et de consentement et j'ai répondu aux questions qu'il m'a posées.

Signature de la personne qui obtient le consentement

Date

3. Signature et engagement du chercheur responsable de ce projet de recherche

Je certifie qu'on a expliqué au représentant légal du sujet de recherche les termes du présent formulaire d'information et de consentement, que l'on a répondu aux questions que le représentant légal avait à cet égard et qu'on lui a clairement indiqué qu'il demeure libre de mettre un terme à la participation du sujet de recherche, et ce, sans préjudice.

Je certifie que l'on a expliqué au sujet de recherche dans un langage adapté à son discernement le projet de recherche, qu'il a compris et qu'il ne s'est pas opposé. Je m'engage à respecter tout refus.

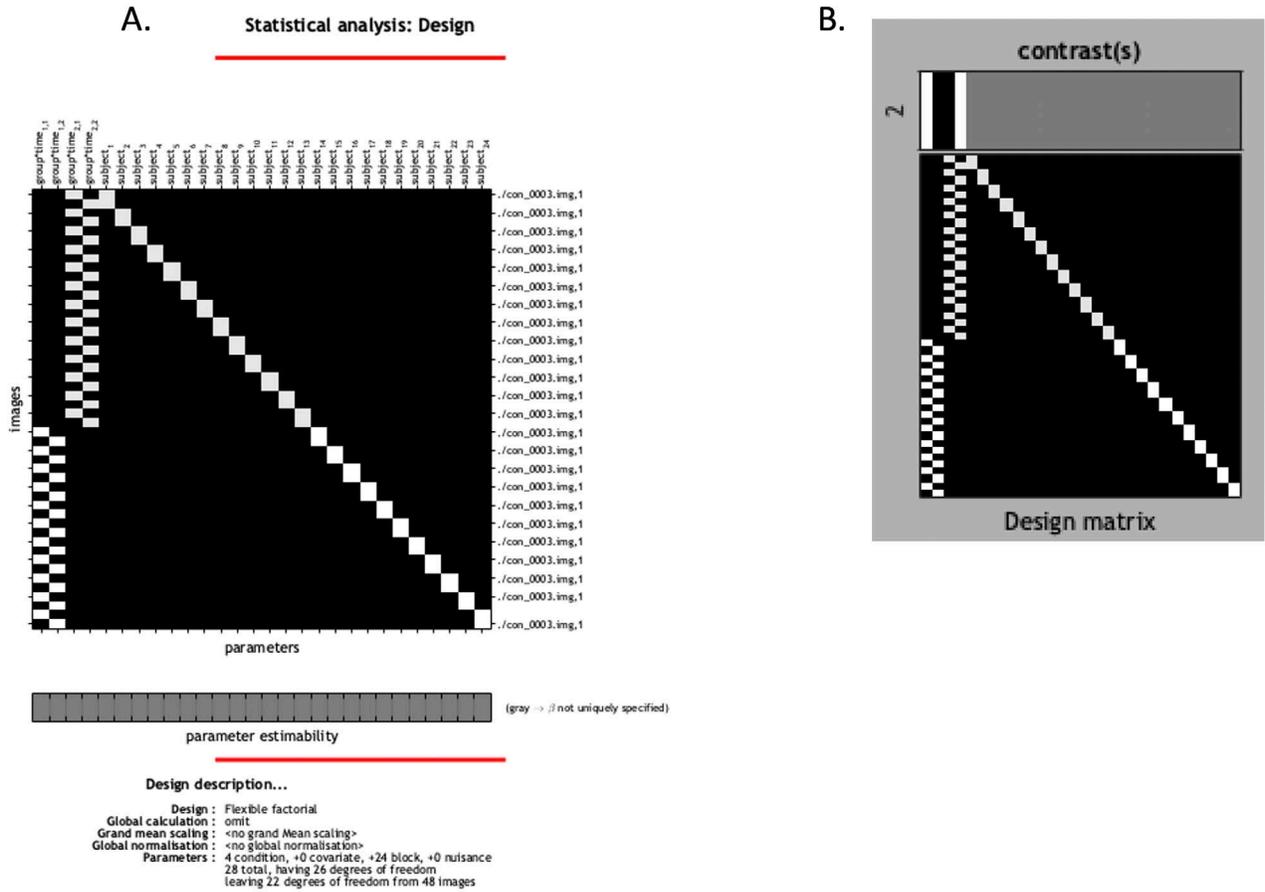
Je m'engage, avec l'équipe de recherche, à respecter ce qui a été convenu au formulaire d'information et de consentement et à en remettre copie signée et datée au représentant légal.

Signature du chercheur responsable de ce projet de recherche

Date

ANNEXE I

MATRICE DE DESIGN ISSUE DE SPM8 REPRÉSENTANT L'ANOVA DE TYPE *FLEXIBLE FACTORIAL*



A. Représentation générale de la matrice de dessin pour l'ANOVA Groupe X Temps.
 B. Représentation de la matrice pour l'effet d'interaction Groupe X Temps.

BIBLIOGRAPHIE

- Adler, R. et J. Taylor (2007). *Random Fields and Geometry*, New York : Springer.
- Aguirre, G. K. (2003). Functional imaging in behavioral neurology and cognitive neuropsychology. Dans T. E. et M. J. Farah. (dir.), *Behavioral Neurology and Neuropsychology* (2^e éd.) (p. 85-96). USA : McGraw-Hill.
- Ahr, E., Borst, G. et Houdé, O. (2016). The learning brain: Neuronal recycling and inhibition. *Zeitschrift für Psychologie*, 224(4), 277.
- Ahr, E., Houdé, O. et Borst, G. (2016). Inhibition of the mirror generalization process in reading in school-aged children. *Journal of experimental child psychology*, 145, 157-165.
- Ahr, E., Houdé, O. et Borst, G. (2017). Predominance of lateral over vertical mirror errors in reading: A case for neuronal recycling and inhibition. *Brain and cognition*, 116, 1-8.
- Allendorfer, J. B., Lindsell, C. J., Siegel, M., Banks, C. L., Vannest, J., Holland, S. K. et Szaflarski, J. P. (2012). Females and males are highly similar in language performance and cortical activation patterns during verb generation. *Cortex*, 48(9), 1218-1233.
- Amalric, M. et Dehaene, S. (2016). Origins of the brain networks for advanced mathematics in expert mathematicians. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 113(18), p. 4909-4917.
- Amaro, E. et Barker, G. J. (2006). Study design in fMRI: basic principles. *Brain and cognition*, 60(3), 220-232.
- Anderson, M. L. (2010). Neural reuse: A fundamental organizational principle of the brain. *Behavioral and brain sciences*, 33(4), 245-266.
- Andler, D. (1989). *Introduction aux sciences cognitives*. Paris: Gallimard.

- Ansari, D. (2008). Effects of development and enculturation on number representation in the brain. *Nature Reviews Neuroscience*, 9(4), 278.
- Ansari, D. (2016). Number symbols in the brain. Dans *Development of Mathematical Cognition* (p. 27-50). Academic Press.
- Ansari, D., De Smedt, B. et Grabner, R. H. (2012). Neuroeducation – A critical overview of an emerging field. *Neuroethics*, 5(2), 105-117.
- Ansari, D. et Dhital, B. (2006). Age-related changes in the activation of the intraparietal sulcus during nonsymbolic magnitude processing: an event-related functional magnetic resonance imaging study. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 18(11), 1820-1828.
- Anthony, J. L. et Lonigan, C. J. (2004). The nature of phonological awareness: Converging evidence from four studies of preschool and early grade school children. *Journal of Educational Psychology*, 96, 43-55.
- Anton, J.-L., Dauchot, K. et Pelegrini-Issac, M. (2006). *SPM99 : Guide pratique pour utilisateur novice*, Récupéré de <http://irmfmrs.free.fr/IMG/pdf/spm99doc.pdf>
- Antony, J. W., Gobel, E. W., O'hare, J. K., Reber, P. J. et Paller, K. A. (2012). Cued memory reactivation during sleep influences skill learning. *Nature neuroscience*, 15(8), 1114.
- Ashburner, J. (2007) A Fast Diffeomorphic Image Registration Algorithm. *NeuroImage*, 38(1), 95-113.
- Ashburner, J. (2012). SPM: a history. *NeuroImage*, 62(2), 791-800.
- Ashburner J., Friston K.J. (2005). Unified segmentation. *NeuroImage*, 26, 839–851.
- Auzias, M. (1975). Une épreuve de latéralité usuelle et rapports entre latéralité usuelle et latéralité graphique chez l'enfant de 5 à 11 ans. *Revue de psychologie appliquée*, 25, 213-252.
- Azevedo, F. A., Carvalho, L. R., Grinberg, L. T., Farfel, J. M., Ferretti, R. E., Leite, R. E., ... Herculano-Houzel, S. (2009). Equal numbers of neuronal and nonneuronal cells make the human brain an isometrically scaled-up primate brain. *Journal of Comparative Neurology*, 513(5), 532-541.

- Ballantyne, A. O., Spilkin, A. M., Hesselink, J. et Trauner, D. A. (2008). Plasticity in the developing brain: intellectual, language and academic functions in children with ischaemic perinatal stroke. *Brain*, 131(11), 2975-2985.
- Bandettini, P. A. et Ungerleider, L. G. (2001). From neuron to BOLD: new connections. *Nature Neuroscience*, 4(9), 864.
- Barlow, H. (2001). The exploitation of regularities in the environment by the brain. *Behavioral and Brain Sciences*, 24(4), 602-607.
- Battro, A. M. et Cardinali, D. P. (1996). *Más cerebro en la educación* [More brain in education] [Electronic version]. La Nación. Récupéré de <http://catamarcaemprende.com/wp-content/uploads/2008/03/cereln.pdf>
- Battro, A. M., Fischer, K. W. et Léna, P. J. (dir.). (2010). *The educated brain: Essays in neuroeducation*. Cambridge University Press.
- Beaulieu, C., Plewes, C., Paulson, L. A., Roy, D., Snook, L., Concha, L. et Phillips, L. (2005). Imaging brain connectivity in children with diverse reading ability. *NeuroImage*, 25(4), 1266-1271.
- Berkson, G. et Fitz-Gerald, F. L. (1963). Eye fixation aspect of attention to visual stimuli in infant chimpanzees. *Science*, 139(3555), 586-587.
- Berlucchi, G. et Buchtel, H. A. (2009). Neuronal plasticity: historical roots and evolution of meaning. *Experimental Brain Research*, 192(3), 307-319.
- Bertrand, D., Fluss, J., Billard, C. et Ziegler, J. C. (2010). Efficacité, sensibilité, spécificité: comparaison de différents tests de lecture. *Année psychologique*, 110(2), 299.
- Bitan, T., Manor, D., Morocz, I. A. et Karni, A. (2005). Effects of alphabeticality, practice and type of instruction on reading an artificial script: An fMRI study. *Cognitive Brain Research*, 25(1), 90-106.
- Blanchette Sarrasin, J., Brault Foisy, L.-M., Auclair, A., Riopel, M. et Masson. S (2020). Guidelines for conducting a pre-post intervention study with preschool children using fMRI: the rationale behind the methodological choices of a research project on reading acquisition. *Neuroéducation*, 6(1), 24-36.

- Bliss, T. V. et Lømo, T. (1973). Long-lasting potentiation of synaptic transmission in the dentate area of the anaesthetized rabbit following stimulation of the perforant path. *The Journal of physiology*, 232(2), 331-356.
- Bolger, D. J., Perfetti, C. A. et Schneider, W. (2005). Cross-cultural effect on the brain revisited: Universal structures plus writing system variation. *Human Brain Mapping*, 25(1), 92-104.
- Bookheimer, S. Y. (2000). Methodological issues in pediatric neuroimaging. *Mental retardation and developmental disabilities research reviews*, 6(3), 161-165.
- Borst, G., Cachia, A., Tissier, C., Ahr, E., Simon, G. et Houdé, O. (2016). Early Cerebral Constraints on Reading Skills in School-Age Children: An MRI Study. *Mind, Brain, and Education*, 10(1), 47-54.
- Borst, G. et Houdé, O. (2014). Inhibitory control as a core mechanism for cognitive development and learning at school. *Perspectives on Language and Literacy*, 40(2), 41.
- Braibant, J.-M. et Gérard, F.-M. (1996). Savoir lire : une question de méthodes. *Bulletin de psychologie scolaire et d'orientation*, 1, 7-45.
- Brault Foisy, L. M., Ahr, E., Masson, S., Houdé, O. et Borst, G. (2017). Is inhibitory control involved in discriminating pseudowords that contain the reversible letters b and d? *Journal of experimental child psychology*, 162, 259-267.
- Brault Foisy, L.-M., Masson, S. et Dehaene, S. (2016). Quand le cerveau se « recycle » pour apprendre à lire et à compter. Numéro thématique « Quand le cerveau entre à l'école », *Vivre le primaire*, 29(3), 35-37.
- Brault Foisy, L.-M., Masson, S., Potvin, P. et Riopel, M. (2015). Is inhibition involved in overcoming a common physics misconception in mechanics?, *Trends in Neuroscience and Education*, 4, 26-36.
- Brault-Foisy, L.-M., Matejko, A., Ansari, D., & Masson, S. (2020). Teachers as orchestrators of neuronal plasticity: Effects of teaching practices on the brain. *Mind, Brain and Education*.
- Brem, S., Bach, S., Kucian, K., Kujala, J. V., Guttorm, T. K., Martin, E., ... Richardson, U. (2010). Brain sensitivity to print emerges when children learn letter–speech sound correspondences. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 107(17), 7939-7944.

- Bridges, D., Smeyers, P. et Smith, R. (2009). *Evidence-based education policy: What evidence? What basis? Whose policy?* Oxford, UK: John Wiley.
- Buchtel, H.A. (1978). On defining neural plasticity. *Archives italiennes de biologie*, 116, 241-247.
- Byars, A. W., Holland, S. K., Strawsburg, R. H., Bommer, W., Dunn, R. S., Schmithorst, V. J. et Plante, E. (2002). Practical aspects of conducting large-scale functional magnetic resonance imaging studies in children. *Journal of child neurology*, 17(12), 885-889.
- Byrne, B. et Fielding-Barnsley, R. (1989). Phonemic awareness and letter knowledge in the child's acquisition of the alphabetic principle. *Journal of Educational Psychology*, 81(3), 313.
- Cachia, A., Roell, M., Mangin, J. F., Sun, Z. Y., Jobert, A., Braga, L., ... Borst, G. (2017). How interindividual differences in brain anatomy shape reading accuracy. *Brain Structure and Function*, 1-12.
- Callan, D. E. et Schweighofer, N. (2010). Neural correlates of the spacing effect in explicit verbal semantic encoding support the deficient-processing theory. *Human Brain Mapping*, 31(4), 645-659.
- Cantlon, J. F., Brannon, E. M., Carter, E. J. et Pelphrey, K. A. (2006). Functional imaging of numerical processing in adults and 4-y-old children. *PLoS Biology*, 4(5), e125.
- Caramazza, A. et Coltheart, M. (2006). Cognitive neuropsychology twenty years on. *Cognitive Neuropsychology*, 23(1), 3-12.
- Carey, S. (2000). Science education as conceptual change. *Journal of Applied Developmental Psychology*, 21(1), 13-19.
- Carroll, J. M. et Snowling, M. J. (2004). Language and phonological skills in children at high risk of reading difficulties. *Journal of Child Psychology and Psychiatry*, 45, 631-640.
- Caviness, Jr, V.S., Kennedy, D.N., Richelme, C., Rademacher, J. et Filipek, P.A. (1996). The human brain age 7-11 years: A volumetric analysis based on magnetic resonance images. *Cerebral Cortex*, 6(5), 726-36.

- Centanni, T. M., King, L. W., Eddy, M. D., Whitfield-Gabrieli, S., & Gabrieli, J. D. (2017). Development of sensitivity versus specificity for print in the visual word form area. *Brain and language*, *170*, 62-70.
- Centanni, T. M., Norton, E. S., Ozernov-Palchik, O., Park, A., Beach, S. D., Halverson, K., ... Gabrieli, J. D. (2019). Disrupted left fusiform response to print in beginning kindergartners is associated with subsequent reading. *NeuroImage: Clinical*, *22*, 101715.
- Changeux, J.P. (1983). *L'homme neuronal*. Paris : Fayard.
- Chee, M. W., Venkatraman, V., Westphal, C. et Siong, S. C. (2003). Comparison of block and event-related fMRI designs in evaluating the word-frequency effect. *Human Brain Mapping*, *18*(3), 186-193.
- Cohen, L., Jobert, A., Le Bihan, D. et Dehaene, S. (2004). Distinct unimodal and multimodal regions for word processing in the left temporal cortex. *Neuroimage*, *23*(4), 1256-1270.
- Cohen, L., Martinaud, O., Lemer, C., Lehericy, S., Samson, Y., Obadia, M., ... Dehaene, S. (2003). Visual word recognition in the left and right hemispheres: Anatomical and functional correlates of peripheral alexias. *Cerebral Cortex*, *13*(12), 1313-1333.
- Cohen, L., Dehaene, S., Naccache, L., Lehéricy, S., Dehaene-Lambertz, G., Hénaff, M. A. et Michel, F. (2000). The visual word form area Spatial and temporal characterization of an initial stage of reading in normal subjects and posterior split- brain patients. *Brain*, *123*(2), 291-307.
- Cohen, L., Lehericy, S., Chochon, F., Lemer, C., Rivaud, S. et Dehaene, S. (2002). Language! specific tuning of visual cortex? Functional properties of the Visual Word Form Area. *Brain*, *125*(5), 1054-1069.
- Conseil supérieur de l'éducation. (2006). *Rapport annuel sur l'état et les besoins de l'éducation 2004-2005, Le dialogue entre la recherche et la pratique en éducation : une clé pour la réussite*. Récupéré de <http://www.cse.gouv.qc.ca/fichiers/documents/publications/CEBE/50-0182.pdf>
- Cooke, S.F. et Bliss, T.V.P. (2006). Plasticity in the central nervous system. *Brain*, *129*, 1659-1673.

- D'Angiulli, A., Weinberg, J., Oberlander, T. F., Grunau, R. E., Hertzman, C. et Maggi, S. (2012). Frontal EEG/ERP correlates of attentional processes, cortisol and motivational states in adolescents from lower and higher socioeconomic status. *Frontiers in Human Neuroscience*, 6, 306.
- De Jong, P. F., Bitter, D. J. L., Van Setten, M. et Marinus, E. (2009). Does phonological recoding occur during silent reading, and is it necessary for orthographic learning? *Journal of Experimental Child Psychology*, 104, 267-282.
- Deauvieu, J. (2013). *Lecture au CP : un effet-manuel considérable*. Paris : Université de Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines et Centre national de la recherche scientifique.
- Deauvieu, J. et Terrail, J.-P. (2018). *Le B-A-BA de la lecture*. La Vie des idées. Récupéré de <https://laviedesidees.fr/Le-B-A-BA-de-la-lecture.html>
- DeFelipe, J. (2006). Brain plasticity and mental processes: Cajal again. *Nature Review Neuroscience*, 7, 811-817.
- Dehaene, S. (1992). Varieties of numerical abilities. *Cognition*, 44(1-2), 1-42.
- Dehaene, S. (2005). Evolution of human cortical circuits for reading and arithmetic: The “neuronal recycling” hypothesis. Dans S. Dehaene, J. R. Duhamel, M. Hauser et G. Rizzolatti (dir.), *From monkey brain to human brain* (p. 133-157). Cambridge, Massachusetts : MIT Press.
- Dehaene, S. (2007). *Les neurones de la lecture*. Paris : Odile Jacob.
- Dehaene, S. (2011). *Apprendre à lire: des sciences cognitives à la salle de classe*. Paris : Odile Jacob.
- Dehaene, S. (2008). Cerebral constraints in reading and arithmetic: Education as a “neuronal recycling” process. Dans A. M. Bhatto, K. W. Fischer et P. J. Léna (dir.), *The educated brain: Essays in neuroeducation* (p. 232-247). Cambridge : Cambridge University Press.
- Dehaene, S. (2010). The massive impact of literacy on the brain and its consequences for education. Dans A. M. Bhatto, S. Dehaene et W. J. Singer (dir.), *Human Neuroplasticity and Education* (p. 19-32). Vatican City : Pontifical Academy of Sciences.

- Dehaene, S. (2014). *Cerveau*. Paris : Éditions de la Martinière.
- Dehaene, S. et Cohen, L. (2007). Cultural recycling of cortical maps. *Neuron*, 56(2), 384-398. doi: 10.1016/j.neuron.2007.10.004
- Dehaene, S., Cohen, L., Sigman, M. et Vinckier, F. (2005). The neural code for written words: a proposal. *Trends in cognitive sciences*, 9(7), 335-341.
- Dehaene, S., Le Clec'H, G., Poline, J.-B., Le Bihan, D. et Cohen, L. (2002). The visual word form area: A prelexical representation of visual words in the fusiform gyrus. *NeuroReport*, 13(3), 321-325.
- Dehaene, S., Pegado, F., Braga, L. W., Ventura, P., Filho, G. N., Jobert, A., ... Cohen, L. (2010). How Learning to Read Changes the Cortical Networks for Vision and Language. *Science*, 330(6009), 1359-1364. doi: 10.1126/science.1194140
- Dehaene, S., Piazza, M., Pinel, P. et Cohen, L. (2003). Three parietal circuits for number processing. *Cognitive Neuropsychology*, 20, 487-506. doi:10.1080/02643290244000239
- Dehaene, S., Spelke, E., Pinel, P., Stanescu, R., Tsivkin, S. (1999). Sources of mathematical thinking: behavioral and brain-imaging evidence. *Science*, 284, 970-974.
- Dehaene-Lambertz, G., Monzalvo, K. et Dehaene, S. (2018). The emergence of the visual word form: Longitudinal evolution of category-specific ventral visual areas during reading acquisition. *PLoS biology*, 16(3), e2004103.
- Dejerine, J. (1892). Contribution à l'étude anatomo-pathologique et clinique des différentes variétés de cécité verbale. *Mémoires de la Société de Biologie*, 4, 61-90.
- Delazer, M., Ischebeck, A., Domahs, F., Zamarian, L., Koppelstaetter, F., Siedentopf, C. M., ... Felber, S. (2005). Learning by strategies and learning by drill — evidence from an fMRI study. *Neuroimage*, 25(3), 838-849.
- Desmond, J. E. et Glover, G. H. (2002). Estimating sample size in functional MRI (fMRI) neuroimaging studies: statistical power analyses. *Journal of neuroscience methods*, 118(2), 115- 128.
- Draganski, B., Gaser, C., Busch, V., Schuierer, G., Bogdahn, U. et May, A. (2004). Changes in grey matter induced by training. *Nature*, 427(6972), 311-312.

- Dufour-Martel, C. (2003). *Assessing French Reading Skills of Elementary French Immersion Students: Utility of DIBELS in French*. Thèse de doctorat non-publiée, University of Oregon.
- Dufour-Martel, C., Desrochers, A. (2011). Psychometric properties of IDAPEL (Indicateurs dynamiques d'habiletés précoces en lecture): French-Language Early Literacy Measures with Students Learning to Read in French. Technical Report No. 12, Eugene, OR : Dynamic Measurement Group.
- Dufour-Martel, C. et Good, R. H. (2009). Investigating the psychometric properties of three French language early reading measures, *Effective Education, 1*, 87-100.
- Dufour-Martel, C., Good, R. H., Dewey, B. et Latimer, R. (2012). Examining the Predictive Validity of IDAPEL Measures with ÉCOLE Criterion Assessments for Determining IDAPEL Benchmark Goals and Cut Points for Risk for French Language First (FL1) Students. Technical Report No. #13. Eugene, OR : Dynamic Measurement Group.
- Durston, S., Hulshoff Pol, H.E., Casey, B.J., Giedd, J.N., Buitelaar, J.K. et van Engeland, H. (2001). Anatomical MRI of the developing human brain: what have we learned? *Journal of American Academy of Child and Adolescent Psychiatry, 40*(9), 1012-1020.
- Eden, G. F. et Zeffiro, T. A. (1998). Neural systems affected in developmental dyslexia revealed by functional neuroimaging. *Neuron, 21*(2), 279-282.
- Ehri, L. C., Nunes, S. R., Stahl, S. A. et Willows, D. M. (2001). Systematic phonics instruction helps students learn to read: Evidence from the National Reading Panel's meta-analysis. *Review of Educational Research, 71*(3), 393-447.
- Eklund, A., Nichols, T. E., & Knutsson, H. (2016). Cluster failure: why fMRI inferences for spatial extent have inflated false-positive rates. *Proceedings of the National Academy of Sciences, 113*(28), 7900-7905.
- Elbro, C. et Jensen, M. N. (2005). Quality of phonological representations, verbal learning, and phoneme awareness in dyslexic and normal readers. *Scandinavian Journal of Psychology, 46*(4), 375-384.
- Feigenson, L., Dehaene, S. et Spelke, E. (2004). Core systems of number. *Trends in cognitive sciences, 8*(7), 307-314.

- Feng, X., Altarelli, I., Monzalvo, K., Ding, G., Ramus, F., Shu, H., ... Dehaene-Lambertz, G. (2019). Shared anomalies in cortical reading networks in Chinese and French dyslexic children. *bioRxiv*, 834945.
- Fischer, K. W. (2009). Mind, brain, and education: building a scientific groundwork for learning and teaching1. *Mind, Brain, and Education*, 3(1), 3-16.
- Fischer, K. W., Daniel, D. B., Immordino-Yang, M. H., Stern, E., Battro, A. et Koizumi, H. (2007). Why mind, brain, and education? Why now? *Mind, Brain, and Education*, 1(1), 1-2.
- Fischer, K. W., Goswami, U., Geake, J. et The Task Force on the Future of Educational Neuroscience (2010). The future of educational neuroscience. *Mind, Brain, and Education*, 4 (2), 68-80.
- Flowers, D. L., Jones, K., Noble, K., VanMeter, J., Zeffiro, T. A., Wood, F. B. et Eden, G. F. (2004). Attention to single letters activates left extrastriate cortex. *Neuroimage*, 21(3), 829-839.
- Fonov, V., Evans, A. C., Botteron, K., Almli, C. R., McKinstry, R. C. et Collins, D. L. (2011). Unbiased average age-appropriate atlases for pediatric studies. *NeuroImage*, 54(1), 313-327.
- Forman, S. G. (2015). *Implementation of mental health programs in schools: A change agent's guide*. Washington, DC: American Psychological Association Books. doi:10.1037/14597-007
- Foth, C., Tischlinger, H. et Rauhut, O. W. (2014). New specimen of Archaeopteryx provides insights into the evolution of pennaceous feathers. *Nature*, 511(7507), 79.
- Friston, K. J., Buechel, C., Fink, G. R., Morris, J, Rolls, E et Dolan, R. J. (1997). Psychophysiological and modulatory interactions in neuroimaging. *NeuroImage*, 6(3), 218-229.
- Friston, K. J., Williams, S., Howard, R., Frackowiak, R. S. et Turner, R. (1996). Movement-related effects in fMRI time-series. *Magnetic resonance in medicine*, 35(3), 346-355.
- Fuhs, M. W. et McNeil, N. M. (2013). ANS acuity and mathematics ability in preschoolers from low-income homes: Contributions of inhibitory control. *Developmental science*, 16(1), 136-148.

- Gaillard, R., Naccache, L., Pinel, P., Clémenceau, S., Volle, E., Hasboun, D., ... Cohen, L. (2006). Direct intracranial, fMRI, and lesion evidence for the causal role of left inferotemporal cortex in reading. *Neuron*, 50(2), 191-204.
- Gallistel, C. R. et Gelman, R. (1992). Preverbal and verbal counting and computation. *Cognition*, 44(1-2), 43-74.
- Geake, J. (2009). *The Brain At School: Educational Neuroscience In The Classroom*. McGraw-Hill Education (UK).
- Geake, J. et Cooper, P. (2003). Cognitive Neuroscience: implications for education? *Westminster Studies in Education*, 26(1), 7-20.
- Genovese, C.R., Lazar, N.A. et Nichols, T. (2002). Thresholding of statistical maps in functional neuroimaging using the false discovery rate, *NeuroImage*, 15(4), 870-878.
- Gentaz, E. et Dessus, P. (2004). *Comprendre les apprentissages : sciences cognitives et éducation*. Paris : Dunod.
- Gervain, J., Macagno, F., Cogoi, S., Peña, M. et Mehler, J. (2008). The neonate brain detects speech structure. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 105(37), 14222-14227.
- Gizewski, E. R., Gasser, T., De Greiff, A., Boehm, A. et Forsting, M. (2003). Cross-modal plasticity for sensory and motor activation patterns in blind subjects. *Neuroimage*, 19(3), 968-975.
- Gough, P. B., & Tunmer, W. E. (1986). Decoding, reading, and reading disability. *Remedial and special education*, 7(1), 6-10.
- Goigoux, R. (2000). Apprendre à lire à l'école : les limites d'une approche idéovisuelle. *Psychologie Française*, 45, 233-244.
- Goigoux, R. (2016). *Étude de l'influence des pratiques d'enseignement de la lecture et de l'écriture sur la qualité des premiers apprentissages*. Lire et Écrire. Récupéré de <http://ife.ens-lyon.fr/ife/recherche/lire-ecrire/rapport/rapport>
- Goswami, U. (2006). Neuroscience and education: from research to practice? *Nature reviews neuroscience*, 7(5), 406.

- Goswami, U. (2008). Principles of learning, implications for teaching: A cognitive neuroscience perspective. *Journal of Philosophy of Education*, 42(3-4), 381-399.
- Gould, S. J. et Vrba, E. S. (1982). Exaptation — a missing term in the science of form. *Paleobiology*, 8(1), 4-15.
- Guckert, M., Mastropieri, M. A. et Scruggs, T. E. (2016). Personalizing research: special educators' awareness of evidence-based practice. *Exceptionality*, 24(2), 63-78.
- Hannagan, T., Amedi, A., Cohen, L., Dehaene-Lambertz, G. et Dehaene, S. (2015). Origins of the specialization for letters and numbers in ventral occipitotemporal cortex. *Trends in cognitive sciences*, 19(7), 374-382.
- Hashimoto, R. et Sakai, K. L. (2004). Learning letters in adulthood: direct visualization of cortical plasticity for forming a new link between orthography and phonology. *Neuron*, 42(2), 311-322.
- Hattie, J. (2013). *Visible learning: A synthesis of over 800 meta-analyses relating to achievement*. Abingdon : Routledge.
- Hattie, J. (2015). The applicability of Visible Learning to higher education. *Scholarship of Teaching and Learning in Psychology*, 1(1), 79.
- Hauser, M. D., Carey, S. et Hauser, L. B. (2000). Spontaneous number representation in semi-free-ranging rhesus monkeys. *Proceedings of the Royal Society of London B: Biological Sciences*, 267(1445), 829-833.
- Hebb, D.O. (1949). *The organization of behaviour: A neuropsychological theory*. New-York : Wiley.
- Helenius, P., Tarkiainen, A., Cornelissen, P., Hansen, P. C. et Salmelin, R. (1999). Dissociation of normal feature analysis and deficient processing of letter-strings in dyslexic adults. *Cerebral Cortex*, 9(5), 476-483.
- Holland, S. K., Plante, E., Byars, A. W., Strawsburg, R. H., Schmithorst, V. J. et Ball Jr, W. S. (2001). Normal fMRI brain activation patterns in children performing a verb generation task. *Neuroimage*, 14(4), 837-843.
- Holland, S. K., Vannest, J., Mecoli, M., Jacola, L. M., Tillema, J. M., Karunanayaka, P. R., ... Byars, A. W. (2007). Functional MRI of language lateralization during development in children. *International journal of audiology*, 46(9), 533-551.

- Houdé, O. (2014). *Apprendre à résister*. Paris : Le Pommier.
- Houdé, O., Kayser, D., Koenig, O., Proust, J. et Rastier, F. (dir.). (2004). Dictionary of cognitive science: neuroscience, psychology, artificial intelligence, linguistics, and philosophy. New-York : Routledge.
- Houdé, O., Pineau, A., Leroux, G., Poirel, N., Perchey, G., Lanoë, C., ... Delcroix, N. (2011). Functional magnetic resonance imaging study of Piaget's conservation-of-number task in preschool and school-age children: a neo-Piagetian approach. *Journal of experimental child psychology*, 110(3), 332-346.
- Houdé, O., Zago, L., Crivello, F., Moutier, S., Pineau, A., Mazoyer, B. et Tzourio-Mazoyer, N. (2001). Access to deductive logic depends on a right ventromedial prefrontal area devoted to emotion and feeling: Evidence from a training paradigm. *NeuroImage*, 14, 1486-1492. doi: 10.1006/nimg.2001.0930
- Huettel, S. A., Song, A. W. et McCarthy, G. (2008). *Functional magnetic resonance imaging*. Sunderland, USA : Sinauer Associates Inc.
- Hurley, S. (2008). The shared circuits model (SCM): How control, mirroring, and simulation can enable imitation, deliberation, and mindreading. *Behavioral and Brain Sciences*, 31(1), 1-22.
- Huttenlocher, P. R. et Dabholkar, A. S. (1997). Regional differences in synaptogenesis in human cerebral cortex. *Journal of comparative Neurology*, 387(2), 167-178.
- Hutzler, F. (2014). Reverse inference is not a fallacy per se: Cognitive processes can be inferred from functional imaging data. *Neuroimage*, 84, 1061-1069.
- Individuals with Disabilities Education Improvement Act. (2004). Washington, DC : US Department of Education.
- Izard, V., Dehaene-Lambertz, G. et Dehaene, S. (2008). Distinct cerebral pathways for object identity and number in human infants. *PLoS biology*, 6(2), e11.
- Izard, V., Sann, C., Spelke, E. S. et Streri, A. (2009). Newborn infants perceive abstract numbers. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 106(25), 10382-10385.
- James, W. (1890). *Principles of psychology*. London : MacMillan.

- Jacquier-Roux, M., Valdois, S., Zorman, M., Lequette, C. et Pouget, G. (2005). *ODEDYS: Un outil de dépistage des dyslexies version 2*. Grenoble : Laboratoire Cogni-sciences, IUFM Grenoble.
- Johansson, B.B. (2004). Brain plasticity in health and disease. *The Keio Journal of Medicine*, 53, 231-24
- Kandel, E.R., Schwartz, J.H. et Jessell, T.M. (2000) *Principles of neural science*. New York : McGraw-hill.
- Kang, S. H., Lindsey, R. V., Mozer, M. C. et Pashler, H. (2014). Retrieval practice over the long term: Should spacing be expanding or equal-interval? *Psychonomic bulletin & review*, 21(6), 1544-1550.
- Karemaker, A., Pitchford, N. J., & O'Malley, C. (2010). Enhanced recognition of written words and enjoyment of reading in struggling beginner readers through whole-word multimedia software. *Computers & Education*, 54(1), 199-208.
- Khomsi, A. (1999). *Epreuve d'évaluation de la compétence en lecture. Lecture de mots et compréhension-révisée. L.M.C-R*. Paris : Éditions du Centre de Psychologie Appliquée.
- Kinnear, P. R. et Gray, C. D. (2011). *IBM SPSS 19 Made Simple*. East Sussex, UK : Psychology Press.
- Kirby, J. R. (2006). Reading comprehension : Its nature ^[11]and development. *Encyclopedia of Language and Literacy Development*. London: Canadian Language and Literacy Research Network.
- Kirk, Roger E. (2013). *Experimental design: Procedures for the behavioral sciences* (4th ed.). Thousand Oaks, CA : Sage.
- Kolinsky, R., Verhaeghe, A., Fernandes, T., Mengarda, E. J., Grimm-Cabral, L. et Morais, J. (2011). Enantiomorphy through the looking glass: Literacy effects on mirror-image discrimination. *Journal of Experimental Psychology: General*, 140(2), 210.
- Kolinsky, R. et Fernandes, T. (2014). A cultural side effect: learning to read interferes with identity processing of familiar objects. *Frontiers in psychology*, 5, 1224.
- Kornell, N. (2009). Optimising learning using flashcards: Spacing is more effective than cramming. *Applied Cognitive Psychology*, 23(9), 1297-1317.

- Kuchinke, L., Jacobs, A. M., Grubich, C., Vö, M. L. H., Conrad, M. et Herrmann, M. (2005). Incidental effects of emotional valence in single word processing: an fMRI study. *Neuroimage*, 28(4), 1022-1032
- Kutner, M. H., Nachtsheim, C. J., Neter, J. et Li, W. (2005). *Applied linear statistical models* (Vol. 5). Boston : McGraw-Hill Irwin.
- Kwok, V., Niu, Z., Kay, P., Zhou, K., Mo, L., Jin, Z., ... Tan, L. H. (2011). Learning new color names produces rapid increase in gray matter in the intact adult human cortex. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 108(16), 6686-6688.
- Kyte, C. S. et Johnson, C. J. (2006). The role of phonological recoding in orthographic learning. *Journal of Experimental Child Psychology*, 93, 166-185.
- Larousse. (2017). *Dictionnaire français en ligne*. Récupéré de <http://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/plasticit%C3%A9/61494?q=plasticit%C3%A9#61087>
- Laurin, N. (2010). *Les prescriptions québécoises sur l'enseignement de la lecture au premier cycle du primaire*. Mémoire de maîtrise inédit. Université du Québec à Chicoutimi.
- Lazar, N. (2008). *The Statistical Analysis of Functional MRI Data*, New York : Springer.
- Le centre de transfert pour la réussite éducative au Québec, CTREQ. (2013). *Innover pour la réussite*. Récupéré de <https://www.ctreq.qc.ca/>
- Lee, K., Lim, Z. Y., Yeong, S. H. M., Ng, S. F., Venkatraman, V. et Chee, M. W. L. (2007). Strategic differences in algebraic problem solving: Neuroanatomical correlates. *Brain Research*, 1155(1), 163-171.
- Lefavrais, P. (2005). *Alouette-R, Test d'analyse de la lecture et de la dyslexie*. Paris : Editions du Centre de Psychologie Appliquée.
- Legendre, R. (2005). *Dictionnaire actuel de l'éducation*. Montréal : Guérin.
- Leroux, G., Lubin, A., Houdé, O. et Lanoë, C. (2013). How to best train children and adolescents for fMRI? Meta-analysis of the training methods in developmental neuroimaging. *Neuroéducation*, 2, 44-70.

- Lété, B., Sprenger-Charolles, L. et Colé, P. (2004). Manulex: A grade-level lexical database from French elementary-school readers. *Behavior Research Methods, Instruments, & Computers*, 36, 156-166
- Lévesque, J., Joannette, Y., Mensour, B., Beaudoin, G., Leroux, J. M., Bourgouin, P. et Beaugard, M. (2004). Neural basis of emotional self-regulation in childhood. *Neuroscience*, 129(2), 361-369.
- Levy, B. A., & Lysynchuk, L. (1997). Beginning word recognition: Benefits of training by segmentation and whole word methods. *Scientific Studies of Reading*, 1(4), 359-387.
- Lieberman, M.D. et Cunningham, W.A. (2009). Type I and Type II error concerns in fMRI research: Re-balancing the scale, *Social Cognitive and Affective Neuroscience*, 4, 423-428.
- Liégeois, F., Connelly, A., Baldeweg, T. et Vargha-Khadem, F. (2008). Speaking with a single cerebral hemisphere: fMRI language organization after hemispherectomy in childhood. *Brain and language*, 106(3), 195-203.
- Lindquist, M. A., Loh, J. M., Atlas, L. Y. et Wager, T. D. (2009). Modeling the hemodynamic response function in fMRI: efficiency, bias and mis-modeling. *Neuroimage*, 45(1), S187-S198.
- Lipton, J. S. et Spelke, E. S. (2003). Origins of number sense: Large-number discrimination in human infants. *Psychological science*, 14(5), 396-401.
- Liu, T. (2012). The development of event-related fMRI designs. *Neuroimage*, 62(2), 1157-1162.
- Liu, X. (2001). Synthesizing research on student conceptions in science. *International Journal of Science Education*, 23, 55-81.
- Lochy, A., Jacques, C., Maillard, L., Colnat-Coulbois, S., Rossion, B. et Jonas, J. (2018). Selective visual representation of letters and words in the left ventral occipito-temporal cortex with intracerebral recordings. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 115(32), E7595-E7604.
- Locke, J. (1690). *Essai sur l'entendement humain*. Londres: Thomas Bassett.
- López-Escribano, C. et Moreno, A. (2014). Neuroscience and education: developmental study of a hemispherectomy case. *Infancia y Aprendizaje*, 37(3), 530-568.

- Luria, A. R. (1963). *Restoration of function after brain injury*. Oxford, England : Pergamon Press.
- Luria, A. R., Naydin, V. L., Tsvetkova, L. S. et Vinarskaya, E. N. (1975). *Restoration of higher brain function following local brain damage*. Dans P. J. Vinken et G. W. Bruyn (dir.), *Handbook of clinical neurology* (p. 368–433). New York : Elsevier.
- Lyytinen, H., Ronimus, M., Alanko, A., Poikkeus, A. M. et Taanila, M. (2007). Early identification of dyslexia and the use of computer game-based practice to support reading acquisition. *Nordic Psychology*, 59(2), 109.
- Maguire, E. A., Spiers, H. J., Good, C. D., Hartley, T., Frackowiak, R. S. et Burgess, N. (2003). Navigation expertise and the human hippocampus: a structural brain imaging analysis. *Hippocampus*, 13(2), 250-259.
- Marinkovic, K., Dhond, R. P., Dale, A. M., Glessner, M., Carr, V. et Halgren, E. (2003). Spatiotemporal dynamics of modality-specific and supramodal word processing. *Neuron*, 38(3), 487-497.
- Marquis, A. (2016). *Analyse argumentative de discours pédagogiques au regard de la réussite scolaire* (Mémoire de maîtrise) Université du Québec à Montréal. Récupéré de <https://archipel.uqam.ca/9076/1/M14368.pdf>
- Martin, A., Kronbichler, M. et Richlan, F. (2016). Dyslexic brain activation abnormalities in deep and shallow orthographies: A meta-analysis of 28 functional neuroimaging studies. *Human brain mapping*, 37(7), 2676-2699.
- Mason, R. A. et Just, M. A. (2016). Neural representations of physics concepts. *Psychological science*, 27(6), 904-913.
- Masson, S. (2012). Neuroeducation: Understanding the brain to improve teaching. *Neuroeducation*, 1(1), 1-2.
- Masson, S. (2014). Cerveau, apprentissage et enseignement: mieux connaître le cerveau peut-il nous aider à mieux enseigner. *Éducation Canada*, 54(4), 40-43.
- Masson, S. (2015). Les apports de la neuroéducation à l'enseignement: des neuromythes aux découvertes actuelles. *Approche neuropsychologique des apprentissages chez l'enfant*, 134, 11-22.
- Masson, S. et Brault Foisy, L. M. (2014). Fundamental concepts bridging education and the brain. *McGill Journal of Education*, 49(2), 501-512.

- Masson, S., Potvin, P., Riopel, M. et Brault Foisy, L.-M. (2014). Differences in brain activation between novices and experts in science during a task involving a common misconception in electricity. *Mind, Brain, and Education*, 8(1), 37-48. doi: 10.1111/mbe.12043
- Maurer, U., Blau, V.C., Yoncheva, Y.N., McCandliss, B.D. (2010). Development of visual expertise for reading: rapid emergence of visual familiarity for an artificial script. *Developmental Neuropsychology*, 35, 404–422.
- Maurer, U., Brandeis, D., McCandliss, B.D. (2005). Fast, visual specialization for reading in English revealed by the topography of the N170 ERP response. *Behavioral and Brain Functions*, 1, 13.
- Maurer, U., Brem, S., Bucher, K., Kranz, F., Benz, R., Steinhausen, H. C. et Brandeis, D. (2007). Impaired tuning of a fast occipito-temporal response for print in dyslexic children learning to read. *Brain*, 130(12), 3200-3210.
- Mazaika, P., Whitfield-Gabrieli, S., Reiss, A. et Glover, G. (2007). Artifact repair for fMRI data from high motion clinical subjects. *Human Brain Mapping*, 2007.
- Mazoyer, B., Zago, L., Jobard, G., Crivello, F., Joliot, M., Perchey, G., ... 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), e101165.
- McCandliss, B. D. (2010). Educational neuroscience: The early years. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 107(18), 8049-8050.
- McCandliss, B. D., Cohen, L. et Dehaene, S. (2003). The visual word form area: expertise for reading in the fusiform gyrus. *Trends in cognitive sciences*, 7(7), 293-299.
- McDermott, J. M., Pears, K. C., Bruce, J., Kim, H. K., Roos, L., Yoerger, K. L. et Fisher, P. A. (2018). Improving kindergarten readiness in children with developmental disabilities: Changes in neural correlates of response monitoring. *Applied Neuropsychology: Child*, 7(3), 187-199.
- McFarquhar, M., McKie, S., Emsley, R., Suckling, J., Elliott, R., & Williams, S. (2016). Multivariate and repeated measures (MRM): A new toolbox for dependent and multimodal group-level neuroimaging data. *NeuroImage*, 132, 373-389.

- McLaren, D. G., Schultz, A. P., Locascio, J. J., Sperling, R. A., & Atri, A. (2011, June). Repeated-measures designs overestimate between-subject effects in fMRI packages using one error term. In *17th Annual Meeting of Organization for Human Brain Mapping* (pp. 26-30).
- Mehler, J. et Bever, T. (1967). Cognitive capacity of very young children. *Science*, *158*, 141–142.
- Menary, R. (2014). Neural plasticity, neuronal recycling and niche construction. *Mind & Language*, *29*(3), 286-303.
- Mesibov, G. B. et Shea, V. (2011). Evidence-based practices and autism. *Autism*, *15*(1), 114-133.
- Meyler, A., Keller, T. A., Cherkassky, V. L., Gabrieli, J. D., & Just, M. A. (2008). Modifying the brain activation of poor readers during sentence comprehension with extended remedial instruction: A longitudinal study of neuroplasticity. *Neuropsychologia*, *46*(10), 2580-2592.
- Milner, A. D. (2017). How do the two visual streams interact with each other? *Experimental brain research*, *235*(5), 1297-1308.
- Monzalvo, K., Fluss, J., Billard, C., Dehaene, S. et Dehaene-Lambertz, G. (2012). Cortical networks for vision and language in dyslexic and normal children of variable socio-economic status. *NeuroImage*, *61*(1), 258-274.
- Murphy, K. et Garavan, H. (2004). An empirical investigation into the number of subjects required for an event-related fMRI study. *NeuroImage*, *22*(2), 879-885.
- Nakamura, K., Dehaene, S., Jobert, A., Le Bihan, D. et Kouider, S. (2005). Subliminal convergence of Kanji and Kana words: further evidence for functional parcellation of the posterior temporal cortex in visual word perception. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *17*(6), 954-968.
- Narr, K. L., Bilder, R. M., Luders, E., Thompson, P. M., Woods, R. P., Robinson, D., ... Toga, A. W. (2007). Asymmetries of cortical shape: effects of handedness, sex and schizophrenia. *NeuroImage*, *34*(3), 939-948.
- National Research Council. (2002). *Scientific research in education. Committee on Scientific Principles for Education Research*. Shavelson, R.J., and Towne, L., Editors. Center for Education. Division of Behavioral and Social Sciences and Education. Washington, DC : National Academy Press.

- Newton, P. M. (2015). The learning styles myth is thriving in higher education. *Frontiers in Psychology*, 6, 1908.
- Nichols, T. et Hayasaka, S. (2003). Controlling the familywise error rate in functional neuroimaging: A comparative review, *Statistical Methods in Medical Research*, 12(5), 419-446.
- No Child Left Behind act. (2001). Washington, DC : US Department of Education.
- O'Reilly, J. X., Woolrich, M. W., Behrens, T. E., Smith, S. M. et Johansen-Berg, H. (2012). Tools of the trade: psychophysiological interactions and functional connectivity. *Social Cognitive and Affective Neuroscience*, 7(5), 604-609
- Oakes, T. R., Johnstone, T., Ores Walsh, K. S., Greischar, L. L., Alexander, A. L., Fox, A. S. et Davidson, R. J. (2005). Comparison of fMRI motion correction software tools. *Neuroimage*, 28(3), 529-543.
- OCDE (2007). Comprendre le cerveau : naissance d'une nouvelle science de l'apprentissage. Paris : Éditions de l'OCDE.
- Ortége, É. et Lété, B. (2010). *eManulex: Electronic version of Manulex and Manulex-infra databases*. Récupéré de <http://www.manulex.org>.
- Oxford. (2017). *Oxford English Dictionary*. Récupéré de <https://en.oxforddictionaries.com/definition/plasticity>
- Pascual-Leone, A., Amedi, A., Fregni, F. et Merabet, L. B. (2005). The plastic human brain cortex. *Annual Review Neuroscience*, 28, 377-401.
- Pascual-Leone, A. et Torres, F. (1993). Plasticity of the sensorimotor cortex representation of the reading finger in Braille readers. *Brain*, 116(1), 39-52.
- Pasquinelli, E. (2011). Knowledge-and Evidence-Based Education: Reasons, Trends, and Contents. *Mind, Brain, and Education*, 5(4), 186-195.
- Pasquinelli, E. (2015). Améliorer le dialogue entre les sciences cognitives et l'éducation en s'inspirant des relations entre la recherche fondamentale et la médecine clinique. *Approche neuropsychologique des apprentissages chez l'enfant*, 134, 23-30

- Pattamadilok, C., Bulnes, L. C., Devlin, J. T., Bourguignon, M., Morais, J., Goldman, S., & Kolinsky, R. (2015). How early does the brain distinguish between regular words, irregular words, and pseudowords during the reading process? Evidence from neurochronometric TMS. *Journal of cognitive neuroscience*, 27(6), 1259-1274
- Peereman, R., Lété, B. et Sprenger-Charolles, L. (2007). Manulex-infra: Distributional characteristics of grapheme-phoneme mappings, infra-lexical and lexical units in child-directed written material. *Behavior Research Methods*, 39, 593-603.
- Pegado, F., Nakamura, K., Cohen, L. et Dehaene, S. (2011). Breaking the symmetry: mirror discrimination for single letters but not for pictures in the Visual Word Form Area. *NeuroImage*, 55(2), 742-749.
- Pegado, F., Nakamura, K. et Hannagan, T. (2014). How does literacy break mirror invariance in the visual system? *Frontiers in psychology*, 5, 703.
- Petersen, S. E. et Dubis, J. W. (2012). The mixed block/event-related design. *NeuroImage*, 62(2), 1177-1184.
- Piaget, J. (1975). *L'équilibration des structures cognitives : problème central du développement*. Paris : Presses universitaires de France.
- Piazza, M., Pinel, P., Le Bihan, D. et Dehaene, S. (2007). A magnitude code common to numerosities and number symbols in human intraparietal cortex. *Neuron*, 53(2), 293-305.
- Pinel, P., Dehaene, S., Riviere, D. et LeBihan, D. (2001). Modulation of parietal activation by semantic distance in a number comparison task. *NeuroImage*, 14(5), 1013-1026.
- Pinel, P. et Dehaene, S. (2013). Genetic and environmental contributions to brain activation during calculation. *Neuroimage*, 81, 306-316.
- Pinel, P., Piazza, M., Le Bihan, D. et Dehaene, S. (2004). Distributed and overlapping cerebral representations of number, size, and luminance during comparative judgments. *Neuron*, 41(6), 983-993.
- Poldrack, R. A. (2006). Can cognitive processes be inferred from neuroimaging data? *Trends in Cognitive Sciences*, 10(2), 59-63.
- Poldrack, R. A. (2007). Region of interest analysis for fMRI. *Social Cognitive and Affective Neuroscience*, 2(1), 67-70.

- Poldrack, R. A. (2011). Inferring mental states from neuroimaging data: from reverse inference to large-scale decoding. *Neuron*, 72(5), 692-697. doi:10.1016/j.neuron.2011.11.001
- Poldrack, R. A., Baker, C. I., Durnez, J., Gorgolewski, K. J., Matthews, P. M., Munafò, M. R., ... & Yarkoni, T. (2017). Scanning the horizon: towards transparent and reproducible neuroimaging research. *Nature reviews neuroscience*, 18(2), 115.
- Poldrack, R. A., Mumford, J. A. et Nichols, T. E. (2011). *Handbook of functional MRI data analysis*. Cambridge University Press.
- Potvin, P. (2013). Proposition for improving the classical models of conceptual change based on neuroeducational evidence: conceptual prevalence. *Neuroéducation*, 2(1), 16-43.
- Potvin, P., Masson, S., Lafortune, S. et Cyr, G. (2014). Persistence of the intuitive conception that heavier objects sink more: A reaction time study with different levels of interference. *International Journal of Science and Mathematics Education*. doi: 10.1007/s10763-014- 9520-6
- Pugh, K. R., Mencl, W. E., Jenner, A. R., Lee, J. R., Katz, L., Frost, S. J., ... Shaywitz, B. A. (2001). Neuroimaging studies of reading development and reading disability. *Learning Disabilities Research & Practice*, 16(4), 240-249.
- Price, C. J. et Devlin, J. T. (2011). The interactive account of ventral occipitotemporal contributions to reading. *Trends in cognitive sciences*, 15(6), 246-253.
- Ramón y Cajal, S. (1894). La fine structure des centres nerveux. The Croonian Lecture. *Proceedings of the Royal Society of London*, 55, 443-468.
- Ramón et Cajal, S. (1895). Algunas conjeturas sobre el mecanismo anatómico de la ideación, asociación y atención. *Revista de Medicina y Cirugía Prácticas*, 36, 497-508.
- Rayner, K., Foorman, B. R., Perfetti, C. A., Pesetsky, D. et Seidenberg, M. S. (2001). How psychological science informs the teaching of reading. *Psychological science in the public interest*, 2(2), 31-74.
- Rayner K., Pollatsek A. et Schotter E. R. (2012). Reading: word identification and eye movements. Dans A. F. Healy, R. W. Proctor et I. B. Weiner (dir.), *Handbook of psychology: Experimental Psychology* (p. 548-577). Hoboken, NJ : John Wiley & Sons Inc.

- Reddy, L. A., Forman, S. G., Stoiber, K. C. et Gonzalez, J. E. (2017). A national investigation of school psychology trainers' attitudes and beliefs about evidence-based practices. *Psychology in the Schools*, 54(3), 261-278.
- Reich, L., Szwed, M., Cohen, L. et Amedi, A. (2011). A ventral visual stream reading center independent of visual experience. *Current Biology*, 21(5), 363-368.
- Reinke, K., Fernandes, M., Schwindt, G., O'Craven, K. et Grady, C. L. (2008). Functional specificity of the visual word form area: general activation for words and symbols but specific network activation for words. *Brain and language*, 104(2), 180-189.
- Richlan, F., Kronbichler, M. et Wimmer, H. (2011). Meta-analyzing brain dysfunctions in dyslexic children and adults. *NeuroImage*, 56(3), 1735-1742.
- Robertson, I. H. et Murre, J. M. (1999). Rehabilitation of brain damage: Brain plasticity and principles of guided recovery. *Psychological bulletin*, 125(5), 544.
- Roiser, J. P., Linden, D. E., Gorno-Tempinin, M. L., Moran, R. J., Dickerson, B. C., & Grafton, S. T. (2016). Minimum statistical standards for submissions to Neuroimage: Clinical. *NeuroImage: Clinical*, 12, 1045.
- Rollenhagen, J. E. et Olson, C. R. (2000). Mirror-image confusion in single neurons of the macaque inferotemporal cortex. *Science*, 287(5457), 1506-1508.
- Rossion, B., Jacques, C. et Jonas, J. (February 26, 2018). Mapping face categorization in the human ventral occipitotemporal cortex with direct neural intracranial recordings. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 10.1111/nyas.13596
- Rossion, B., Joyce, C. A., Cottrell, G. W. et Tarr, M. J. (2003). Early lateralization and orientation tuning for face, word, and object processing in the visual cortex. *Neuroimage*, 20(3), 1609-1624.
- Royal Society (2011). *Neuroscience: Implications for education and lifelong learning*. London : The Royal Society.
- Sanchez, C. E., Richards, J. E. et Almli, C. R. (2012). Neurodevelopmental MRI brain templates for children from 2 weeks to 4 years of age. *Developmental psychobiology*, 54(1), 77-91.

- Schlaggar, B. L., Brown, T. T., Lugar, H. M., Visscher, K. M., Miezin, F. M. et Petersen, S. E. (2002). Functional neuroanatomical differences between adults and school-age children in the processing of single words. *Science*, 296(5572), 1476-1479.
- Schlaggar, B. L. et McCandliss, B. D. (2007). Development of neural systems for reading. *Annual Review of Neuroscience*, 30, 475-503.
- Schmithorst, V. J., Holland, S. K. et Plante, E. (2006). Cognitive modules utilized for narrative comprehension in children: a functional magnetic resonance imaging study. *NeuroImage*, 29(1), 254-266.
- Schuster, S., Hawelka, S., Richlan, F., Ludersdorfer, P. et Hutzler, F. (2015). Eyes on words: A fixation-related fMRI study of the left occipito-temporal cortex during self-paced silent reading of words and pseudowords. *Scientific reports*, 5(1), 1-11.
- Shankweiler, D. et Fowler, A. E. (2004). Questions people ask about the role of phonological processes in learning to read. *Reading and Writing: An Interdisciplinary Journal*, 17, 483-515.
- Segalowitz, S. J. (2014). *Language functions and brain organization*. New-York : Elsevier.
- Share, D. L. (1995). Phonological recoding and self-teaching: Sine qua non of reading acquisition. *Cognition*, 55(2), 151-218.
- Share, D. L. (1999). Phonological recoding and orthographic learning: a direct test of the self-teaching hypothesis. *Journal of Experimental Child Psychology*, 72, 95-129.
- Share, D. L. (2011). On the role of phonology in reading acquisition: The self-teaching hypothesis. Dans S. A. Brady, D. Braze et C. A. Fowler (dir.), *Explaining individual differences in reading* (p. 45-68). New York : Psychology Press.
- Shonkoff, J. P. et Levitt, P. (2010). Neuroscience and the future of early childhood policy: Moving from why to what and how. *Neuron*, 67(5), 689-691.
- Shaywitz, B. A., Shaywitz, S. E., Pugh, K. R., Mencl, W. E., Fulbright, R. K., Skudlarski, P., ... Gore, J. C. (2002). Disruption of posterior brain systems for reading in children with developmental dyslexia. *Biological Psychiatry*, 52(2), 101-110.

- Sherrington, C.S. (1897). *The central nervous system*. Dans M. Foster (dir.). Textbook of physiology (vol 3). London : Macmillan.
- Simos, P. G., Fletcher, J. M., Bergman, E., Breier, J. I., Foorman, B. R., Castillo, E. M., ... Papanicolaou, A. C. (2002). Dyslexia-specific brain activation profile becomes normal following successful remedial training. *Neurology*, 58(8), 1203-1213.
- Simpson, R. (2005). Evidence-based practice in developmental disabilities: What is it and why does it matter? *Journal on Developmental Disabilities*, 12, 167–171.
- Singer, W. (2008). Epigenesis and brain plasticity in education. Dans A. M. Battro, K. W. Fischer et P. J. Léna (dir.), *The educated brain: Essays in neuroeducation* (p. 97-109). Cambridge : Cambridge University Press.
- Slavin, R. E. (2002). Evidence-based education policies: Transforming educational practice and research. *Educational researcher*, 31(7), 15-21.
- Slavin, R. E. (2008). Evidence-based reform in education: What will it take? *European Educational Research Journal*, 7(1), 124-128.
- Smith, S.M. (2004). Overview of fMRI analysis, *The British Journal of Radiology*, 77, S167-S175.
- Smolen, P., Zhang, Y. et Byrne, J. H. (2016). The right time to learn: mechanisms and optimization of spaced learning. *Nature Reviews Neuroscience*, 17(2), 77.
- Sohn, M. H., Goode, A., Koedinger, K. R., Stenger, V. A., Fissell, K., Carter, C. S. et Anderson, J. R. (2004). Behavioral equivalence, but not neural equivalence — neural evidence of alternative strategies in mathematical thinking. *Nature neuroscience*, 7(11), 1193-1194.
- Snow, C. E. et Juel, C. (2005). Teaching children to read: What do we know about how to do it? Dans M. J. Snowling et C. Hulme (dir.), *The science of reading: A handbook* (p. 501-520). Oxford, UK : Blackwell.
- Spitzer, M. (2012). Education and neuroscience. *Trends in Neuroscience and Education*, 1(1), 1-2.
- Sprenger-Charolles, L. (2003). Reading acquisition: Cross linguistic data. *Handbook of children's literacy*, 43-66.

- Sprenger-Charolles, L. et Casalis, S. (1996). *Lire. Lecture/écriture: acquisition et troubles du développement*. Paris : PUF.
- Stephenson, J. (2009). Best practice? Advice provided to teachers about the use of Brain Gym in Australian schools. *Australian Journal of Education*, 53(2), 109-124.
- Stevens, W. D., Kravitz, D. J., Peng, C. S., Tessler, M. H. et Martin, A. (2017). Privileged functional connectivity between the visual word form area and the language system. *Journal of Neuroscience*, 37(21), 5288-5297.
- Stuart, M. et Coltheart, M. (1988). Does reading develop in a sequence of stages? *Cognition*, 30, 139-181.
- Szwed, M., Dehaene, S., Kleinschmidt, A., Eger, E., Valabrègue, R., Amadon, A. et Cohen, L. (2011). Specialization for written words over objects in the visual cortex. *Neuroimage*, 56(1), 330-344.
- Szwed, M., Ventura, P., Querido, L., Cohen, L. et Dehaene, S. (2012). Reading acquisition enhances an early visual process of contour integration. *Developmental science*, 15(1), 139-149.
- Taylor, J. S. H., Rastle, K. et Davis, M. H. (2013). Can cognitive models explain brain activation during word and pseudoword reading? A meta-analysis of 36 neuroimaging studies. *Psychological bulletin*, 139(4), 766.
- Tarkiainen, A., Cornelissen, P. L. et Salmelin, R. (2002). Dynamics of visual feature analysis and object level processing in face versus letter string perception. *Brain*, 125(5), 1125-1136.
- Telzer, E. H., McCormick, E. M., Peters, S., Cosme, D., Pfeifer, J. H., & van Duijvenvoorde, A. C. (2018). Methodological considerations for developmental longitudinal fMRI research. *Developmental cognitive neuroscience*, 33, 149-160.
- Temple, E., Deutsch, G. K., Poldrack, R. A., Miller, S. L., Tallal, P., Merzenich, M. M. et Gabrieli, J. D. (2003). Neural deficits in children with dyslexia ameliorated by behavioral remediation: evidence from functional MRI. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 100(5), 2860-2865.
- Thacker, N. A., Burton, E., Lacey, A. J. et Jackson, A. (1999). The effects of motion on parametric fMRI analysis techniques. *Physiological measurement*, 20(3), 251.

- Thaler, V., Ebner, E. M., Wimmer, H. et Landerl, K. (2004). Training reading fluency in dysfluent readers with high reading accuracy: Word specific effects but low transfer to untrained words. *Annals of dyslexia*, 54(1), 89-113.
- Théodoridou, Z. D. et Triarhou, L. C. (2009). Fin-de-siècle Advances in Neuroeducation: Henry Herbert Donaldson and Reuben Post Halleck. *Mind, Brain, and Education*, 3(2), 119-129.
- Thesen, T., McDonald, C. R., Carlson, C., Doyle, W., Cash, S., Sherfey, J., ... Kuzniecky, R. (2012). Sequential then interactive processing of letters and words in the left fusiform gyrus. *Nature communications*, 3(1), 1-8.
- Thirion, B., Pinel, P., Mériaux, S., Roche, A., Dehaene, S. et Poline, J.B. (2007). Analysis of a large fMRI cohort: Statistical and methodological issues for group analyses, *NeuroImage*, 35(1), 105-120.
- Turk-Browne, N. B., Isola, P. J., Scholl, B. J. et Treat, T. A. (2008). Multidimensional visual statistical learning. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 34(2), 399.
- Turk-Browne, N. B., Jungé, J. A. et Scholl, B. J. (2005). The automaticity of visual statistical learning. *Journal of Experimental Psychology: General*, 134, 552-564.
- Turk-Browne, N. B., Scholl, B. J., Chun, M. M. et Johnson, M. K. (2009). Neural evidence of statistical learning: Efficient detection of visual regularities without awareness. *Journal of cognitive neuroscience*, 21(10), 1934-1945.
- Turkeltaub, P. E., Gareau, L., Flowers, D. L., Zeffiro, T. A., et Eden, G. F. (2003). Development of neural mechanisms for reading. *Nature Neuroscience*, 6(7), 767-773.
- Turner, B. O., Paul, E. J., Miller, M. B., & Barbey, A. K. (2018). Small sample sizes reduce the replicability of task-based fMRI studies. *Communications Biology*, 1(1), 1-10.
- Van Atteveldt, N. et Ansari, D. (2014). How symbols transform brain function: A review in memory of Leo Blomert. *Trends in Neuroscience and Education*, 3(2), 44-49.
- van de Walle de Ghelcke, A., Rossion, B., Schiltz, C. et Lochy, A. (2020). Impact of learning to read in a mixed approach on neural tuning to words in beginning readers. *Frontiers in Psychology*, 10, 3043.

- Van Duijvenvoorde, A. C., Zanolie, K., Rombouts, S. A., Raijmakers, M. E. et Crone, E. A. (2008). Evaluating the negative or valuing the positive? Neural mechanisms supporting feedback-based learning across development. *Journal of Neuroscience*, 28(38), 9495-9503.
- Van Empelen, R., Jennekens-Schinkel, A., Van Rijen, P. C., Helders, P. J. et Van Nieuwenhuizen, O. (2005). Health-related Quality of Life and Self-perceived Competence of Children Assessed before and up to Two Years after Epilepsy Surgery. *Epilepsia*, 46(2), 258-271.
- Varela, F. J. (1989). *Connaître. Les Sciences cognitives*. Paris : Seuil.
- Vargha-Khadem, F., Gadian, D. G., Watkins, K. E., Connelly, A., Van Paesschen, W. et Mishkin, M. (1997). Differential effects of early hippocampal pathology on episodic and semantic memory. *Science*, 277(5324), 376-380.
- Vidal, C. (2005). Brain, sex and ideology. *Diogenes*, 52(4), 127-133.
- Vidal, C. (2012). The sexed brain: between science and ideology. *Neuroethics*, 5(3), 295-303.
- Viennot, L. (1978). Le raisonnement spontané en dynamique élémentaire. *Revue française de pédagogie*, 16-24.
- Vignaux, G. (1991). *Les sciences cognitives: une introduction*. Paris : Éditions La découverte.
- Vigneau, M., Jobard, G., Mazoyer, B. et Tzourio-Mazoyer, N. (2005). Word and non-word reading: what role for the visual word form area? *Neuroimage*, 27(3), 694-705.
- Vogel, S. E., Matejko, A., A. et Ansari, D. (2016). Imaging the developing human brain using functional and structural Magnetic Resonance Imaging: Methodological and practical guidelines. Dans J. Prior et J. V. Herwegen (dir.), *Practical Research with Children* (p. 72-95). New York, NY : Routledge.
- Wade, M., Fox, N. A., Zeanah, C. H. et Nelson, C. A. (2019). Long-term effects of institutional rearing, foster care, and brain activity on memory and executive functioning. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 201809145.
- Wandell, B. A. (2011). The neurobiological basis of seeing words. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1224(1), 63.

- Wang, K., Banich, M. T., Reineberg, A. E., Leopold, D. R., Willcutt, E. G., Cutting, L. E., ... & Lu, Z. L. (2020). Left posterior prefrontal regions support domain-general executive processes needed for both reading and math. *Journal of Neuropsychology*.
- Ward, J. (2010). *The student's guide to cognitive neuroscience: Second edition*. New York : Psychology Press.
- Wechsler, D. (2012). *Wechsler Preschool and Primary Scale of Intelligence—fourth edition technical manual and interpretive manual*. San Antonio, TX : Psychological Corporation.
- Wilke, M., Holland, S. K., Altaye, M. et Gaser, C. (2008). Template-O-Matic: a toolbox for creating customized pediatric templates. *NeuroImage*, 41(3), 903-913.
- Wilke, M., Holland, S. K., Myseros, J. S., Schmithorst, V. J. et Ball, W. S. (2003). Functional magnetic resonance imaging in pediatrics. *Neuropediatrics*, 34(5), 225-233.
- Willingham, D. (2013, 26 mars). *A New Push for Science in Education in Britain*. [Billet de blogue]. Récupéré de <http://www.danielwillingham.com/daniel-willingham-science-and-education-blog/category/teaching>
- Woodruff, G. et Premack, D. (1981). Primitive mathematical concepts in the chimpanzee: proportionality and numerosity. *Nature*, 293(5833), 568.
- Wolf, M. (2008). A triptych of the reading brain: Evolution, development, pathology, and its intervention. Dans A. M. Battro, K. W. Fischer et P. J. Léna (dir.), *The educated brain: Essays in neuroeducation* (p. 183-197). Cambridge : Cambridge University Press.
- Xu, F. (2003). Numerosity discrimination in infants: Evidence for two systems of representations. *Cognition*, 89(1), B15-B25.
- Xu, F. et Spelke, E. S. (2000). Large number discrimination in 6-month-old infants. *Cognition*, 74(1), B1-B11.
- Xue, G., Chen, C., Jin, Z. et Dong, Q. (2006). Language experience shapes fusiform activation when processing a logographic artificial language: an fMRI training study. *Neuroimage*, 31(3), 1315-1326.

- Yeatman, J. D., Rauschecker, A. M. et Wandell, B. A. (2013). Anatomy of the visual word form area: adjacent cortical circuits and long-range white matter connections. *Brain and language*, 125(2), 146-155.
- Yoncheva, Y. N., Blau, V. C., Maurer, U. et McCandliss, B. D. (2010). Attentional focus during learning impacts N170 ERP responses to an artificial script. *Developmental Neuropsychology*, 35(4), 423-445. doi: 10.1080/87565641.2010.480918
- Yoncheva, Y. N., Wise, J. et McCandliss, B. (2015). Hemispheric specialization for visual words is shaped by attention to sublexical units during initial learning. *Brain and language*, 145, 23-33.
- Yuan, W., Altaye, M., Ret, J., Schmithorst, V., Byars, A. W., Plante, E. et Holland, S. K. (2009). Quantification of head motion in children during various fMRI language tasks. *Human brain mapping*, 30(5), 1481-1489.
- Zaromb, F. M. et Roediger, H. L. (2010). The testing effect in free recall is associated with enhanced organizational processes. *Memory & Cognition*, 38(8), 995-1008.
- Zhang, T., Shen, H. et Li, F. (2016). Linear and Non-linear Models for fMRI Time Series Analysis. Dans H. Ombao, M. Lindquist, W. Thompson et J. Aston (dir.), *Handbook of Neuroimaging Data Analysis* (p. 309-333), New York : Chapman and Hall/CRC.
- Ziegler, J. C., Perry, C. et Zorzi, M. (2014). Modelling reading development through phonological decoding and self-teaching: Implications for dyslexia. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 369(1634), 20120397.