

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL

EFFETS D'UN ENSEIGNEMENT DU CONCEPT DE NEUROPLASTICITÉ SUR LA
MOTIVATION, LA MOBILISATION DU CONTRÔLE INHIBITEUR ET LA
PERFORMANCE À UNE TÂCHE CONTRE-INTUITIVE EN MATHÉMATIQUES

THÈSE

PRÉSENTÉE

COMME EXIGENCE PARTIELLE

DU DOCTORAT EN ÉDUCATION

PAR

JÉRÉMIE BLANCHETTE SARRASIN

DÉCEMBRE 2024

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.12-2023). 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.»

“no research supports the idea that low grades prompt students to try harder”
(Guskey, 2015, p. 98)

REMERCIEMENTS

Cette thèse doctorale est le fruit d'un travail d'envergure, qui n'aurait pu voir le jour sans la contribution de plusieurs personnes. Je tiens à remercier les personnes qui ont rendu ce projet possible, qui m'ont permis d'évoluer à travers cette expérience et avec qui j'ai partagé beaucoup de plaisir. Je remercie d'abord du fond du cœur mon directeur de recherche, Steve Masson, sans qui je ne serais pas là où je suis aujourd'hui. Steve, merci pour ta confiance, merci de t'être lancé avec moi dans ce projet pour le moins ambitieux. Merci de m'avoir si bien guidée à chacune des étapes et aidée à garder la tête froide lors des moments plus difficiles. Merci pour tes conseils, ta rigueur, ton intelligence et ton dévouement pour la neuroéducation, tu m'impressionnes depuis le jour 1. Ton accompagnement assidu et bienveillant m'a permis de grandir énormément à travers ce parcours et ce, depuis le début de ma maîtrise.

Je tiens aussi à remercier chaleureusement mon codirecteur de recherche, Martin Riopel, qui m'inspire, m'anime et me donne espoir. Martin, ta vision du monde, ta vivacité d'esprit et ton discernement me rejoignent profondément et éveillent en moi le désir de développer une vision du monde empreinte d'autant de sagesse. Merci pour tes conseils toujours plus judicieux les uns que les autres, pour ta perspicacité et ton équilibre, et pour nos discussions passionnantes. Ta capacité à faire progresser les choses avec autant de pertinence et d'efficacité suscite chez moi une profonde admiration. Tu resteras toujours un modèle et une source d'inspiration pour moi.

Un « grand merci » à ma chère et inestimable alliée, sans qui je ne sais pas ce que je serais devenue. De collègue exceptionnelle à précieuse complice, sa présence et son soutien inconditionnels ont été des piliers essentiels dans mon parcours, sur le plan intellectuel comme sur le plan émotionnel. Lorie, merci pour ton dévouement indéfectible, ton esprit d'équipe et tes qualités exceptionnelles de chercheuse. Merci pour nos discussions infinies, pour ton écoute et tes conseils rassurants. Je suis vraiment reconnaissante que nos chemins se soient croisés, c'est un privilège de t'avoir dans ma vie. Soleil muffin!

Je tiens aussi à souligner la contribution de mon amie Geneviève Allaire-Duquette qui a été une mentore remarquable, particulièrement dans la réalisation des analyses cérébrales cruciales pour

ce projet. Gen, merci pour ta patience, toi qui roules à cent milles à l'heure. Ton énergie, ton organisation impeccable et ton investissement m'épatent constamment. Merci pour ces moments, passant de réflexions et casse-têtes SPM aux confidences, qui ont rendu cette aventure encore plus précieuse.

Une mention particulière à mes deux acolytes et colocs de bureau, Sophie McMullin et Elisabeth Bélanger, qui ont joué un rôle central et indispensable dans la collecte des données du projet (*IRM warriors*). Je n'y serais pas arrivée sans leur précieuse aide. Merci pour votre dévouement et votre flexibilité pour ce projet, je vous en suis de tout cœur reconnaissante. Sophie, partenaire de réflexions et de points de vue de toutes sortes, merci de t'être investie sans réserve dans ce projet depuis ses débuts. Elisabeth, définition même de l'efficacité, merci d'avoir embarqué à 100 % dans ce projet un peu fou et d'y avoir mis toute ton énergie.

Je souhaite bien entendu exprimer ma gratitude envers les élèves et parents ayant activement participé à ce projet. Leur courage, leur intérêt et leur générosité ont été des piliers essentiels sans lesquels rien de tout cela n'aurait été possible. Je les remercie du fond du cœur.

Merci à Patrice Potvin, pour m'avoir « ordonné » d'arrêter de lire de nouveaux articles lors de la rédaction de ma discussion et pour m'avoir donné les derniers petits *boosts* d'énergie nécessaires à la finalisation de ma rédaction.

Finalement, je souhaite souligner l'important rôle de ma famille dans ce parcours. Ma petite maman, partie au ciel dans la tempête, qui a toujours eu une confiance absolue en moi; mon cher papa, toujours présent pour moi, sans exception, sur qui je peux toujours compter; mon frère et ma sœur qui m'écoutent, me *challengent* et me supportent (dans tous les sens), avec amour; et mon conjoint exceptionnel, avec qui je repousse chaque jour les limites du possible. Je vous remercie pour votre intérêt pour tout ce que je vous raconte et pour votre soutien inconditionnel. Je vous en suis éternellement reconnaissante.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	ii
LISTE DES FIGURES	vii
LISTE DES TABLEAUX	viii
RÉSUMÉ.....	ix
INTRODUCTION.....	1
CHAPITRE I PROBLÉMATIQUE	3
1.1 Difficulté à corriger des erreurs fréquentes et persistantes	3
1.2 Rôle du contrôle inhibiteur dans la correction des erreurs fréquentes et persistantes.....	5
1.3 Stratégies pédagogiques favorisant la mobilisation du contrôle inhibiteur.....	6
1.4 Variables modératrices dans la relation entre un enseignement du concept de neuroplasticité et les résultats scolaires	8
1.5 Question de recherche	10
CHAPITRE II CADRE THÉORIQUE	12
2.1 Contrôle inhibiteur	12
2.1.1 Définition et théorie	12
2.1.2 Rôle du contrôle inhibiteur dans l'apprentissage des mathématiques	14
2.1.3 Mesure du contrôle inhibiteur	17
2.2 Effets d'un enseignement du concept de neuroplasticité.....	21
2.2.1 Relation entre un enseignement du concept de neuroplasticité, les mécanismes cérébraux et la performance	21
2.2.2 Principale théorie sous-jacente à l'enseignement du concept de neuroplasticité : l'état d'esprit.....	26
2.2.3 Proposition d'un nouveau modèle de la motivation	30
2.3 Hypothèses de recherche.....	35
CHAPITRE III MÉTHODOLOGIE	38
3.1 Devis de recherche	38
3.2 Participants	39
3.2.1 Sélection et échantillon	39

3.2.2 Recrutement	41
3.3 Interventions.....	42
3.4 Collecte des données	44
3.4.1 Questionnaires.....	44
3.4.2 Imagerie par résonance magnétique fonctionnelle.....	49
3.4.3 Tâche de comparaison de fractions	51
3.5 Analyse des données comportementales	56
3.6 Analyse des données cérébrales	57
3.6.1 Étapes de prétraitements	57
3.6.2 Traitement statistique des données.....	58
3.7 Considérations éthiques.....	61
 CHAPITRE IV RÉSULTATS	 63
4.1 Résultats comportementaux	63
4.1.1 Questionnaire motivationnel	63
4.1.2 Tâche de comparaison de fractions	67
4.2. Résultats cérébraux	69
4.2.1 L'analyse du volume cérébral entier.....	70
4.2.2 L'analyse par région d'intérêt	74
4.2.3 Analyse complémentaire.....	76
4.3 Synthèse des résultats.....	77
 CHAPITRE V DISCUSSION.....	 79
5.1 Interprétation des résultats	80
5.1.1 Hypothèse 1 : effets d'un enseignement du concept de neuroplasticité sur la motivation	80
5.1.2 Hypothèse 2 : effets d'un enseignement de la neuroplasticité sur la mobilisation du contrôle inhibiteur	82
5.1.3 Hypothèse 3 : effets d'un enseignement de la neuroplasticité sur la performance à la tâche de comparaison de fractions	88
5.1.4 Relation entre la motivation et la mobilisation du contrôle inhibiteur.....	90
5.2 Implications pédagogiques.....	93
5.3 Limites de la recherche	99
5.4 Perspectives de recherche futures	103
 CONCLUSION	 106

ANNEXE A Formulaire de consentement	109
ANNEXE B Formulaire dépistage en IRM.....	115
ANNEXE C Paramètres d'acquisition des images anatomiques et fonctionnelles	117
ANNEXE D Questionnaire de présélection en mathématiques	118
ANNEXE E Questionnaire motivationnel	122
ANNEXE F Stimuli de la tâche	123
RÉFÉRENCES.....	124

LISTE DES FIGURES

2.1	Identification des principales régions cérébrales associées au contrôle inhibiteur	20
2.2	Modèle illustrant les relations présumées entre les différents construits motivationnels et leur influence sur le comportement de l'élève	33
3.1	Devis de recherche	39
3.2	Extrait des consignes de la tâche concernant la rétroaction	52
4.1	Score motivationnel total en prétest et en posttest pour chacun des groupes	66
4.2	Différences entre le prétest et le posttest pour le questionnaire motivationnel.....	66
4.3	Temps de réponse, en millisecondes, à la tâche de comparaison de fractions pour chaque groupe.....	68
4.4	Taux de réussite, en pourcentage, à la tâche de comparaison de fractions pour chaque groupe.....	69
4.5	A. Analyse du volume cérébral entier : activations significatives à un seuil non corrigé pour l'effet d'interaction. B. Analyse par région d'intérêt : activation significative du cortex préfrontal ventrolatéral gauche à un seuil corrigé $p_{(FWE-cluster)} < 0,05$ pour l'effet d'interaction .	75
4.6	ANOVA pour les moyennes individuelles des valeurs bêta pour les conditions intuitive et contre-intuitive pour l'activation dans le cortex préfrontal ventrolatéral gauche (-36 18 21, BA 44/45).....	76
5.1	Sous-divisions anatomiques formant le cortex préfrontal ventrolatéral.....	84
5.2	Modèle illustrant les relations appuyées par les résultats de la présente recherche	97

LISTE DES TABLEAUX

2.1 Continuum sur lequel peuvent se situer les perceptions des élèves quant aux quatre construits motivationnels identifiés	31
3.1 Rotation de la matrice des composantes	48
4.1 Différences intergroupes en prétest et en posttest pour le questionnaire motivationnel	64
4.2 Différences intragroupes entre le prétest et le posttest pour le questionnaire motivationnel ..	65
4.3 Temps de réponse en millisecondes à la tâche de comparaison de fractions	67
4.4 Résultats de l'analyse de variance à mesures répétées pour les temps de réponse	67
4.5 Taux de réussite en pourcentage à la tâche de comparaison de fractions	69
4.6 Résultats de l'analyse de variance à mesures répétées pour les taux de réussite	69
4.7 Régions cérébrales significativement associées à l'interaction du groupe (expérimental/contrôle) et de la condition (intuitive/contre-intuitive) (ANOVA).....	70
4.8 Régions cérébrales significativement plus activées pour chacun des groupes (expérimental/contrôle) et chacune des conditions (intuitive/contre-intuitive) (tests-t pairés).....	72
4.9 Régions cérébrales significativement associées à l'interaction du groupe (expérimental/contrôle) et de la condition (intuitive/contre-intuitive) (ANOVA, seuil non corrigé).....	73
4.10 Effet d'interaction du groupe (expérimental/contrôle) et de la condition (intuitive/contre-intuitive) par analyse par région d'intérêt avec masque latéralisé à gauche du cortex préfrontal ventrolatéral <i>pars triangularis</i>	74
4.11 Valeurs bêta pour l'activation significative dans le CPVL gauche.....	75
4.12 Résultats de l'analyse de variance à mesures répétées pour les valeurs bêta de l'activation dans le CPVL gauche	76
4.13 Matrice de corrélation pour la régression linéaire liée à l'activité cérébrale dans le CPVL gauche	77

RÉSUMÉ

Plusieurs études mettent en évidence que l'un des obstacles importants à la réussite des élèves est la difficulté à corriger des erreurs fréquentes et persistantes (Babai, Younis et Stavy, 2014; Vosniadou et Vershaffel, 2004). Ce type d'erreurs serait lié à la difficulté à résister à certains automatismes se manifestant souvent lors de situations contre-intuitives, alors que la réponse appropriée nécessite d'*inhiber*, c'est-à-dire de résister à un automatisme menant à une erreur (Houdé, 2014; Houdé *et al.*, 2000). Ces erreurs sont reconnues comme étant particulièrement persistantes et résistantes à l'enseignement et donc difficiles à corriger (Babai *et al.*, 2014; Vamvakoussi *et al.*, 2012). Comparativement à des erreurs qui se corrigent plus facilement, ce type d'erreurs représente un défi considérable pour une grande proportion d'élèves et constitue un grand obstacle à l'apprentissage et à la réussite des élèves (Babai *et al.*, 2014; Obersteiner *et al.*, 2013). En effet, de nombreuses erreurs, notamment en mathématiques, seraient dues à une difficulté à inhiber des automatismes (D'Amico et Passolunghi, 2009), d'où l'importance de se pencher sur les moyens permettant d'améliorer la capacité des élèves à mobiliser le contrôle inhibiteur.

Certaines études suggèrent qu'une stratégie prometteuse consiste à enseigner aux élèves comment leur cerveau fonctionne et apprend, en abordant notamment le concept de neuroplasticité (Blanchette Sarrasin *et al.*, 2018; Schroder *et al.*, 2014). Cela consiste à expliquer aux élèves qu'il est possible de modifier les connexions entre leurs neurones, que ces connexions se renforcent et deviennent plus efficaces avec l'effort, la pratique et l'utilisation de stratégies appropriées et qu'ainsi, en se pratiquant à résister à des automatismes, ils pourront s'améliorer à le faire (Ward, 2010). Cet enseignement favoriserait possiblement la mobilisation du contrôle inhibiteur, notamment parce qu'il permettrait de favoriser l'adoption de certaines croyances motivationnelles chez les élèves, telles qu'un état d'esprit dynamique. Cela consiste à croire que les habiletés et compétences peuvent se développer, comparativement à un état d'esprit fixe selon lequel les habiletés sont des traits fixes qui n'évoluent pas (Blackwell *et al.*, 2007; Dweck, 2000). Ainsi, ces croyances motivationnelles influenceraient la réaction de l'élève face à l'erreur : lorsqu'on lui signale qu'il a commis une erreur, un élève ayant un état d'esprit dynamique aurait davantage tendance à mobiliser des mécanismes cérébraux de correction d'erreurs, notamment ceux liés au contrôle inhibiteur, ce qui entraînerait une meilleure performance (Mangels *et al.*, 2006; Moser *et al.*, 2011; Schroder *et al.*, 2017) et se répercuterait sur certains apprentissages et résultats scolaires (Blackwell *et al.*, 2007; Lanoë *et al.*, 2015). Une méta-analyse montre que l'effet d'un enseignement de la neuroplasticité serait d'autant plus fort auprès des élèves « à risque » en mathématiques ($g = 0,78$) (Blanchette Sarrasin *et al.*, 2018), possiblement en raison d'un état d'esprit plus fixe au départ chez ces élèves (Chouinard *et al.*, 2004; Issaieva, 2013) et dans ce domaine (Rattan *et al.*, 2012). Selon cette méta-analyse, les élèves « à risque » sont ceux qui présentent des facteurs de vulnérabilité susceptibles de nuire à leur réussite, comme de faibles résultats antérieurs. À notre connaissance, aucune recherche n'avait toutefois étudié l'impact d'un enseignement du concept de neuroplasticité chez des élèves qui, sans nécessairement être « à risque » ou en échec scolaire, commettent fréquemment des erreurs dans des tâches qui nécessitent le contrôle inhibiteur. Pourtant, comme cet enseignement du concept de neuroplasticité vise notamment à favoriser la mobilisation du contrôle inhibiteur, il pourrait être particulièrement bénéfique chez les élèves pour qui il est plus difficile de le mobiliser. De plus, les difficultés à inhiber sont fréquemment associées à des difficultés scolaires, notamment en mathématiques

(Passolunghi et Siegel, 2004), qui elles sont associées à un état d'esprit plus fixe (Baird *et al.*, 2009; Chouinard *et al.*, 2004; Issaieva, 2013; Perret *et al.*, 2011). Cela laisse entendre que l'effet de l'enseignement du concept de neuroplasticité sur la mobilisation du contrôle inhibiteur et la performance serait susceptible d'être plus grand chez ces élèves.

Ainsi, considérant que la difficulté à mobiliser le contrôle inhibiteur est l'un des plus grands obstacles à la réussite des élèves et que peu d'études se sont penchées sur les stratégies pédagogiques visant à y remédier, il apparaît plus que pertinent d'étudier les effets d'une stratégie prometteuse pour favoriser cette mobilisation, soit un enseignement de la neuroplasticité. Considérant que ces erreurs se répercutent fréquemment sur la réussite des élèves, notamment en mathématiques (Fischbein et Schnarch, 1997; Vamvakoussi *et al.*, 2012), et que la littérature montre un effet plus grand d'un enseignement de la neuroplasticité dans ce domaine, la présente recherche a été réalisée auprès d'élèves qui commettent fréquemment des erreurs dans des tâches qui nécessitent le contrôle inhibiteur, dans le contexte d'une tâche contre-intuitive en mathématiques. La question de recherche est donc la suivante : « Quels sont les effets d'un enseignement du concept de neuroplasticité sur la motivation, la mobilisation du contrôle inhibiteur et sur la performance à une tâche contre-intuitive en mathématiques? »

Cette étude comparative a été menée auprès d'élèves de 10 à 12 ans recrutés via des écoles de la grande région de Montréal. L'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle (IRMf), une technique de neuroimagerie, a été utilisée dans la présente recherche afin d'observer la mobilisation du contrôle inhibiteur (p. ex., via l'activation du cortex préfrontal ventrolatéral) lors de la réalisation d'une tâche contre-intuitive de comparaison de fractions. Les différences entre un groupe expérimental ($n = 22$), recevant l'enseignement du concept de neuroplasticité sous la forme d'une courte [vidéo](#), et un groupe contrôle ($n = 22$), recevant une intervention contrôle, ont été étudiées. La vidéo expérimentale, inspirée de Lanoë et ses collaborateurs (2015) et d'une durée de 5 minutes, aborde notamment la façon dont l'effort, la pratique et l'utilisation de stratégies appropriées améliorent l'efficacité des connexions neuronales, ce qui permet de s'améliorer. La présente recherche visait à vérifier les hypothèses selon lesquelles cet enseignement du concept de neuroplasticité dans le groupe expérimental entraînerait une augmentation de la motivation, du contrôle inhibiteur et de la performance à la tâche de comparaison de fractions, comparativement au groupe contrôle.

Les résultats concernant la motivation permettent d'observer une amélioration significative du score motivationnel total entre le prétest et le posttest pour le groupe expérimental, mais pas pour le groupe contrôle. Sur le plan cérébral, les résultats montrent une activation significative du cortex préfrontal ventrolatéral dans le groupe expérimental pour la condition contre-intuitive, comparativement au groupe contrôle. Quant à eux, les résultats à la tâche de comparaison de fractions ne permettent pas d'observer de différences significatives entre les groupes, que ce soit sur le plan des temps de réponse ou des taux de réussite. Il semble donc que l'enseignement du concept de neuroplasticité ait eu un effet significatif sur la motivation et sur l'activité cérébrale liée au contrôle inhibiteur, mais que cet effet n'ait pas été suffisant pour que les élèves du groupe expérimental puissent compléter la mise en place du contrôle inhibiteur et que cela se reflète dans les temps de réponse et les taux de réussite à la tâche de comparaison de fractions.

En somme, cette recherche permet non seulement de documenter les effets d'un enseignement de la neuroplasticité, mais également de mieux comprendre pourquoi et comment une telle

intervention entraîne des effets positifs sur la motivation et l'activité cérébrale liée au contrôle inhibiteur. Ces résultats, bien que modestes et observés pour la première fois seulement, permettent déjà d'éclairer la pertinence d'introduire dans les écoles un enseignement de la neuroplasticité sous la forme d'une intervention courte, simple et non coûteuse. Cette intervention offre donc un rapport coûts-bénéfices intéressant, car en plus de favoriser la motivation des élèves, elle semble favoriser une activité cérébrale contribuant à la mobilisation du contrôle inhibiteur lors d'apprentissages réputés comme étant difficiles et contre-intuitifs. Bien que cette courte intervention de nature générale (non spécifique à une discipline) n'ait pas eu d'impact immédiat sur le plan comportemental, on peut penser que la mobilisation de régions cérébrales liées au contrôle inhibiteur constitue une première étape pour y parvenir. Ces résultats permettent également d'envisager des pistes de recherche futures concernant ce type d'intervention, afin d'outiller les enseignants et les futurs enseignants pour mieux intervenir auprès de leurs élèves ayant moins de facilité à mobiliser le contrôle inhibiteur.

INTRODUCTION

La décennie des années 90, souvent surnommée la « décennie du cerveau », a été caractérisée par des avancées notables sur le plan de l'émergence des technologies d'imagerie cérébrale et des connaissances neuroscientifiques. Ces progrès ont naturellement suscité l'attention de la communauté de recherche en éducation, donnant naissance à une nouvelle approche interdisciplinaire : la neuroéducation. Cette discipline novatrice vise à établir un lien entre le fonctionnement cérébral et les mécanismes liés à l'apprentissage et à l'enseignement, explorant ainsi les implications pédagogiques des découvertes neuroscientifiques dans le milieu éducatif. Alors que les études en neurosciences se concentrent sur la compréhension intrinsèque du cerveau, la neuroéducation cherche à optimiser cette compréhension pour comprendre et résoudre des problématiques éducatives concrètes. Ainsi, ces recherches sont directement orientées vers les défis rencontrés dans le milieu éducatif, offrant un potentiel considérable pour influencer positivement les pratiques pédagogiques.

Des recherches en neuroéducation (p. ex., Masson, 2012) ont d'ailleurs permis d'étudier sous un nouvel angle une problématique bien documentée dans le domaine de l'éducation depuis plusieurs années : celle des erreurs fréquentes et persistantes, qui se produisent dans les situations dites « contre-intuitives ». En effet, ces recherches ont permis de mettre en évidence le rôle du contrôle inhibiteur dans ces erreurs difficiles à corriger, ainsi que les mécanismes cérébraux sous-jacents. Le contrôle inhibiteur, cette fonction exécutive permettant d'inhiber, c'est-à-dire de bloquer ou de freiner, un automatisme s'activant spontanément dans le cerveau d'un individu au profit d'un raisonnement plus approprié à la situation, est en effet central dans la correction des erreurs fréquentes et persistantes. D'autres recherches (p. ex., Babai *et al.*, 2015; Houdé *et al.*, 2000, 2001) se sont ensuite intéressées aux moyens de favoriser la mobilisation du contrôle inhibiteur afin d'aider les élèves à corriger leurs erreurs fréquentes et persistantes, et l'une des pistes récurrentes concerne l'enseignement du concept de neuroplasticité. Enseigner aux élèves que leur cerveau est malléable et qu'il crée et renforce ses connexions avec l'effort et la pratique permettrait d'améliorer ses habiletés et influencerait différentes variables motivationnelles, comme la perception de contrôle ou de compétence. Ce changement dans les croyances motivationnelles des élèves les mènerait ensuite à adopter davantage de *comportements orientés vers un but*, tels que fournir des

efforts, être attentif aux éléments pertinents, utiliser des stratégies appropriées, persévérer et mobiliser le contrôle inhibiteur. Comme ces comportements augmentent les taux de réussite d'une tâche, leur adoption se répercuterait donc ensuite positivement sur la performance des élèves. À partir de ce corpus de littérature, cette recherche vise donc à mieux comprendre les effets d'un enseignement du concept de neuroplasticité sur la motivation, la mobilisation du contrôle inhibiteur et la performance à une tâche contre-intuitive en mathématiques, chez des élèves qui commettent fréquemment des erreurs dans des tâches nécessitant le contrôle inhibiteur.

Le premier chapitre de cette thèse présente la problématique éducative liée à la difficulté pour les élèves de surmonter et corriger des erreurs fréquentes et persistantes et au rôle du contrôle inhibiteur dans la correction de ces erreurs, puis justifie la pertinence scientifique et sociale de s'intéresser aux effets d'un enseignement de la neuroplasticité pour favoriser sa mobilisation. Le deuxième chapitre détaille le cadre théorique sous-jacent au projet de recherche, menant à formuler les hypothèses de recherche, suivi du troisième chapitre détaillant la méthodologie suivie pour répondre à la question de recherche et confirmer ou infirmer les hypothèses. Le quatrième chapitre présente les résultats comportementaux et cérébraux, et enfin, le cinquième et dernier chapitre aborde l'interprétation des résultats et leurs implications pédagogiques, en plus de discuter des limites de la recherche et de perspectives de recherche futures.

CHAPITRE I

PROBLÉMATIQUE

Ce premier chapitre présente la problématique éducative sous-jacente au projet de recherche. On fait d'abord état de la difficulté pour les élèves de surmonter et corriger des erreurs dites *fréquentes et persistantes*, qui nuisent à leur réussite. Il est ensuite question du rôle et de l'importance du contrôle inhibiteur dans la correction de ces erreurs, puis des stratégies pédagogiques étudiées jusqu'à maintenant pour favoriser la mobilisation de ce contrôle inhibiteur dans les situations *contre-intuitives*. Certaines variables modératrices entre l'une de ces stratégies (soit un enseignement du concept de neuroplasticité) et les résultats scolaires sont ensuite abordées. Ces réflexions mènent finalement à la formulation de la question de recherche guidant le présent projet.

1.1 Difficulté à corriger des erreurs fréquentes et persistantes

Certains apprentissages s'avèrent particulièrement difficiles pour les élèves. Bien que plusieurs facteurs puissent être à l'origine de ces difficultés, par exemple une complexité intrinsèque des contenus ou le caractère abstrait de certaines notions, un nombre considérable d'études mettent en évidence qu'un important obstacle à la réussite des élèves concerne la difficulté à corriger des erreurs fréquentes et persistantes (Babai, Younis et Stavy, 2014; Vamvakoussi, Van Dooren et Verschaffel, 2012; Vosniadou et Verschaffel, 2004). Ce type d'erreurs se produit dans différents domaines, mais principalement lors de situations contre-intuitives, c'est-à-dire des situations scolaires dans lesquelles l'élève a tendance à raisonner de façon automatique ou intuitive, alors que la réponse appropriée nécessite de surmonter un automatisme ou une intuition (Houdé et Borst, 2015). Par exemple, il arrive fréquemment qu'un élève écrive « je les manges », car il a automatisé l'action de mettre un *s* signifiant le pluriel après le déterminant *les* (Lubin *et al.*, 2012). Or, bien que cet automatisme soit utile dans la plupart des situations, dans ce cas-ci, il mène l'élève à commettre une erreur. C'est également la raison pour laquelle on dit parfois que ces situations comportent un « piège ». Un autre exemple concerne la résolution de problèmes en mathématiques : « Marie a 5 billes. Elle en a 3 de plus que Jean. Combien Jean a-t-il de billes? » Lorsqu'ils sont confrontés à ce type de problème, les élèves ont tendance à associer spontanément

de plus avec l'addition et ainsi « tomber dans le piège », en effectuant une addition et répondant que Jean possède 8 billes, alors que ce raisonnement mène à une réponse erronée (Lubin *et al.*, 2013). Plusieurs situations contre-intuitives sont également présentes dans l'apprentissage des sciences, notamment concernant le concept de flottabilité. Une conception fréquente et persistante, mais inexacte, est de penser que les objets plus lourds coulent davantage, alors que c'est la masse volumique qui détermine la flottabilité d'un objet et non simplement sa masse (Potvin *et al.*, 2015). Ces exemples illustrent donc des situations scolaires dans lesquelles émerge un conflit ou une interférence entre deux raisonnements et pour lesquelles un raisonnement automatique ou intuitif menant à une erreur prévaut fréquemment, alors que devrait plutôt prévaloir un raisonnement moins automatique ou moins intuitif, mais qui mène à une réponse exacte.

Les erreurs fréquemment commises lors de ce type de situation contre-intuitive sont reconnues comme étant particulièrement persistantes et résistantes à l'enseignement. En effet, malgré qu'on ait enseigné le raisonnement approprié à plusieurs reprises, elles semblent résister à cet enseignement puisque régulièrement, une majorité d'élèves continuent de les commettre, par exemple dans le cas des fractions ou des probabilités (Babai *et al.*, 2014; Fischbein et Schnarch, 1997; Vamvakoussi *et al.*, 2012; Van de Walle et Lovin, 2008). Certaines recherches montrent également que certaines situations contre-intuitives représentent une difficulté supplémentaire même chez des adultes (Babai *et al.*, 2014; Rossi *et al.*, 2019; Vamvakoussi, 2015) et chez des experts dans leur domaine (Brault Foisy *et al.*, 2015; Masson *et al.*, 2014; Obersteiner *et al.*, 2013). En effet, chez des étudiants du baccalauréat en physique, une étude démontre que 25 % d'entre eux croient toujours qu'une balle en métal tombera plus rapidement au sol qu'une balle en plastique de la même grosseur (en négligeant la résistance de l'air), malgré que ce ne soit pas le cas et qu'ils aient reçu un enseignement formel à ce sujet (Wandersee *et al.*, 1994). Ainsi, ces erreurs fréquentes basées sur un raisonnement automatique ou intuitif sont persistantes, résistantes à l'enseignement et donc difficiles à corriger. Comparativement à des erreurs qui se corrigent plus facilement (par exemple dans une situation ne comportant pas de piège), ce type d'erreurs représente un défi considérable pour une grande proportion d'élèves et constitue l'un des plus grands obstacles à l'apprentissage et à la réussite des élèves (Babai *et al.*, 2014; Vosniadou et Vershaffel, 2004).

1.2 Rôle du contrôle inhibiteur dans la correction des erreurs fréquentes et persistantes

Un grand corpus d'études a tenté d'approfondir la compréhension de ces erreurs afin de trouver des solutions et outils pour aider les élèves à les corriger (Babai *et al.*, 2014, 2018; Houdé, 2014). L'une des explications permettant de mieux comprendre la difficulté à corriger ces erreurs serait que pour réussir lors d'une situation contre-intuitive, il ne suffit pas à l'élève de *connaître* le raisonnement approprié, il lui faut également *inhiber*, c'est-à-dire contrôler ou bloquer le raisonnement intuitif menant à une erreur (Houdé, 2014; Houdé *et al.*, 2000). En effet, ce raisonnement automatique ou intuitif étant plus spontané, il a tendance à se manifester avant le raisonnement approprié, malgré le fait que l'élève puisse connaître ou comprendre ce raisonnement approprié. La difficulté à freiner, et donc à inhiber, le raisonnement automatique ou intuitif expliquerait donc la persistance de ces erreurs (Houdé, 2014; Houdé *et al.*, 2000).

Ce contrôle inhibiteur, aussi appelé *inhibition*, est une fonction exécutive et constitue, au niveau cognitif, la capacité à résister aux automatismes de la pensée (Houdé, 2014). Au niveau cérébral, il consiste en la désactivation d'un réseau de neurones (conduisant à une erreur) par un autre réseau de neurones (permettant à la réponse appropriée de se manifester); il constitue ainsi un mécanisme de correction d'erreurs (Masson, 2012). Ainsi, selon le modèle de Houdé (2004, 2014), l'*heuristique*, soit l'automatisme menant au raisonnement intuitif, est rapide, spontanée et ne requiert que peu d'effort cognitif, alors que l'*algorithme*, soit le raisonnement approprié, est plus lent, contrôlé et requiert un plus grand effort cognitif. Afin de surmonter la tendance à répondre à l'aide d'un raisonnement automatique ou intuitif, qui mène à une erreur lors de situations contre-intuitives, il est nécessaire d'inhiber le réseau de neurones lié à cette heuristique et d'activer celui lié à l'algorithme (Houdé et Borst, 2014).

Par exemple, lorsqu'un élève écrit « je les manges », le réseau de neurones lié à l'automatisme de « mettre un *s* après *les* » cause une interférence avec la règle d'accord du verbe *mange* avec le pronom *je*. Un autre exemple souvent relevé dans la littérature concerne l'apprentissage des fractions, qui semble influencé par des réseaux de neurones solidement ancrés menant souvent les élèves à commettre des erreurs, particulièrement lors de la comparaison de fractions (Gómez *et al.*, 2015; Obersteiner *et al.*, 2013; Rossi *et al.*, 2019). En effet, bien que les fractions représentent un concept difficile à apprendre pour plusieurs raisons (Charalambous et Pitta-Pantazi, 2007), l'une

d'elles concerne le fait que les propriétés des nombres rationnels (dont les fractions) ne sont pas les mêmes que celles des nombres naturels (entiers et supérieurs ou égal à 0) (Rossi *et al.*, 2019; Van de Walle et Lovin, 2008). Conséquemment, comme les élèves sont habitués de travailler avec des nombres naturels lorsqu'on leur introduit le concept de fraction, ils ont tendance à appliquer les propriétés des nombres naturels aux fractions, ce qui peut régulièrement les mener à commettre des erreurs (Van Hoof *et al.*, 2018). Par exemple, les élèves ayant tendance à considérer les deux composantes d'une fraction comme deux nombres indépendants, plutôt que comme un rapport entre le numérateur et le dénominateur, cela les mène régulièrement à affirmer qu'un tiers est plus petit qu'un quart, puisqu'ils ont automatisé la connaissance selon laquelle trois est plus petit que quatre (Gómez *et al.*, 2015, 2019; Meert *et al.*, 2010; Rossi *et al.*, 2019; Van de Walle et Lovin, 2008; Van Hoof *et al.*, 2018). Or, ce raisonnement fonctionne dans le cas des nombres naturels, mais pas dans le cas des nombres rationnels : dans le cas de la comparaison de fractions, l'élève doit comparer la valeur entière des fractions plutôt que leurs composantes (numérateur ou dénominateur). Afin de surmonter l'interférence causée par l'automatisme de comparer les nombres présents dans les fractions plutôt que leur valeur, il serait donc nécessaire de résister à cette tendance et d'inhiber le raisonnement intuitif (trois est plus petit que quatre) pour permettre au raisonnement approprié de se manifester (Meert *et al.*, 2010). En effet, de nombreuses études, qui seront abordées dans le cadre théorique, appuient l'idée selon laquelle le contrôle inhibiteur jouerait un rôle dans la comparaison de fractions. D'ailleurs, il est aujourd'hui bien documenté que de nombreuses erreurs, notamment en mathématiques, sont associées à une difficulté à inhiber des raisonnements intuitifs (D'Amico et Passolunghi, 2009; Gómez *et al.*, 2015; Passolunghi et Siegel, 2001, 2004), d'où l'importance de se pencher sur les moyens d'aider les élèves à mobiliser les mécanismes liés au contrôle inhibiteur.

1.3 Stratégies pédagogiques favorisant la mobilisation du contrôle inhibiteur

Considérant la fréquence et la persistance des erreurs nécessitant la mobilisation du contrôle inhibiteur, plusieurs études ont tenté de trouver des moyens d'aider les élèves à surmonter ces erreurs fréquentes par le biais des mécanismes cérébraux liés au contrôle inhibiteur, en se questionnant notamment sur les stratégies pédagogiques qui pourraient faciliter la mobilisation de ces mécanismes. Par exemple, Houdé *et al.* (2000, 2001) ont proposé un enseignement du contrôle inhibiteur impliquant la mise en place d'alertes et l'identification des réponses qui constituent des

pièges. Alors qu'une alerte consiste à prévenir les apprenants qu'ils auront tendance, dans un contexte donné, à utiliser un raisonnement intuitif les menant à une erreur ou à un piège, l'identification des réponses qui constituent des pièges consiste à entraîner les apprenants à identifier (par exemple à nommer ou à encercler parmi un choix de réponses) ces réponses tentantes, mais erronées. Les résultats démontrent que les régions cérébrales liées au contrôle inhibiteur sont plus activées après cet enseignement, comparativement à avant, ce qui permet aux élèves de freiner le raisonnement intuitif et d'éviter de tomber dans le piège. Une autre étude ne portant que sur l'efficacité des alertes décrites plus haut arrive à une conclusion similaire (Babai *et al.*, 2015). Bien que certaines pistes soient donc actuellement étudiées pour favoriser la mobilisation du contrôle inhibiteur, il convient tout de même d'examiner d'autres stratégies visant à favoriser cette mobilisation à ce stade-ci de l'avancement de la recherche sur cette thématique, notamment parce que ces premières pistes d'intervention sont limitées.

D'ailleurs, une autre stratégie potentielle pour aider les élèves à inhiber consiste à leur enseigner comment fonctionne leur cerveau, plus spécifiquement en abordant le concept de neuroplasticité. La neuroplasticité réfère à l'idée que les connexions entre les neurones se modifient par l'apprentissage et que ces connexions se renforcent avec la pratique et l'effort (Ward, 2010). Ainsi, plusieurs écrits scientifiques suggèrent que le fait d'enseigner aux élèves ce concept, par exemple en leur mentionnant que lorsqu'ils apprennent, leur cerveau se modifie et devient plus efficace, permettrait de favoriser l'activation des mécanismes cérébraux de correction d'erreurs, notamment ceux liés au contrôle inhibiteur (Moser *et al.*, 2011; Schroder *et al.*, 2014, 2017). La plupart des études à ce sujet expliquent cette relation entre un enseignement du concept de neuroplasticité et la mobilisation du contrôle inhibiteur via un concept motivationnel, soit l'*état d'esprit* des élèves (Blackwell *et al.*, 2007; Moser *et al.*, 2011; Schroder *et al.*, 2014, 2017). Le concept d'état d'esprit, ou *mindset* en anglais, a été introduit par Dweck et ses collaborateurs (1988, 2000, 2002) pour expliquer pourquoi certains élèves semblent percevoir leurs erreurs comme des défis à relever alors que d'autres les perçoivent davantage comme une confirmation de leur incapacité à réussir une tâche. Selon la théorie de Dweck (2000), un état d'esprit dynamique, ou *growth mindset*, consiste à croire que les habiletés peuvent se développer par la pratique, l'effort et l'utilisation de stratégies appropriées, tandis qu'un état d'esprit fixe, ou *fixed mindset*, est la croyance selon laquelle les habiletés sont des traits plutôt fixes qui n'évoluent pas.

Ainsi, contrairement au fait de détenir un état d'esprit fixe, un état d'esprit dynamique aurait des effets positifs sur la réaction de l'élève face à l'erreur : lorsque l'élève croit qu'il peut s'améliorer, il semble percevoir son erreur non pas comme la confirmation d'une incapacité à accomplir la tâche demandée, mais comme un défi à relever, ce qui le motive (Dweck, 2000, 2017). Ainsi, lorsqu'on signale à un élève ayant un état d'esprit dynamique qu'il a commis une erreur, par exemple à l'aide d'une rétroaction correctrice (indiquer si la réponse est correcte ou incorrecte), il aurait tendance à utiliser davantage de *comportements orientés vers un but*, tels que fournir des efforts, être attentif aux éléments pertinents, utiliser des stratégies appropriées, persévérer et mobiliser le contrôle inhibiteur. Des recherches ont en effet mis en lumière, à l'aide de l'électroencéphalographie (EEG), qu'un état d'esprit dynamique favorisait une plus grande attention lors d'une erreur ainsi que le déploiement de l'effort requis pour éviter de la commettre à nouveau (correspondant à la mobilisation du contrôle inhibiteur), notamment lors de tâches neuropsychologiques (Moser *et al.*, 2011; Schroder *et al.*, 2014, 2017). Une plus grande mobilisation du contrôle inhibiteur entraînerait de cette façon de meilleurs taux de réussite (Mangels *et al.*, 2006; Moser *et al.*, 2011; Schroder *et al.*, 2014, 2017), ce qui se répercuterait ensuite sur certains apprentissages et résultats scolaires (Blackwell *et al.*, 2007; Lanoë *et al.*, 2015). Ainsi, enseigner aux élèves le concept de neuroplasticité semble représenter une avenue intéressante afin de faciliter la mobilisation du contrôle inhibiteur et ultimement influencer positivement leur performance, via certaines variables motivationnelles.

1.4 Variables modératrices dans la relation entre un enseignement du concept de neuroplasticité et les résultats scolaires

Parmi les études s'étant intéressées à la relation entre un enseignement du concept de neuroplasticité et les résultats scolaires, certaines ont obtenu des résultats divergents (p. ex., Blackwell *et al.*, 2007 et Dommett *et al.*, 2013). Une méta-analyse à ce sujet met en lumière des variables modératrices susceptibles d'expliquer ces divergences, c'est-à-dire des variables pouvant influencer l'ampleur de l'effet observé (Blanchette Sarrasin *et al.*, 2018). Elle démontre d'abord que l'effet d'un enseignement de la neuroplasticité sur la réussite scolaire en général serait plus fort chez les élèves à risque ($g = 0,39$), comparativement aux élèves n'étant pas considérés à risque ($g = 0,28$), et ce, particulièrement en mathématiques ($g = 0,78$), comparativement au français ($g = 0,51$) et au « score de moyenne générale » (*grade point average*, GPA) ($g = 0,21$). Dans ces

études, les « élèves à risque » représentaient ceux présentant des facteurs de vulnérabilité, comme un faible statut socioéconomique (Good *et al.*, 2003) ou une appartenance à une minorité visible (Aronson *et al.*, 2002). Dans l'étude de Blackwell *et al.* (2007), les élèves vivant la transition entre le primaire et le secondaire étaient également considérés « à risque ». Ces résultats concernant le plus grand effet chez les élèves à risque s'expliquent sans doute notamment par le fait que les résultats scolaires des élèves plus performants subissent généralement un effet plafond. Autrement dit, puisque ces élèves réussissent déjà bien, une amélioration est plus difficile à percevoir chez eux. Cela s'expliquerait peut-être également par le fait que les élèves plus faibles semblent souvent présenter un état d'esprit plus fixe, et donc une motivation plus faible, que les autres élèves (Baird *et al.*, 2009; Chouinard *et al.*, 2004; Issaieva, 2013; Perret *et al.*, 2011).

À notre connaissance, aucune recherche n'a toutefois étudié l'impact d'un enseignement du concept de neuroplasticité chez des élèves qui, sans nécessairement être « à risque » ou en échec scolaire, commettent fréquemment des erreurs dans des tâches qui nécessitent le contrôle inhibiteur. Pourtant, l'étude de Gómez *et al.* (2019) suggère que 50 % des élèves de 10 à 12 ans ayant participé à leur étude se retrouveraient dans cette catégorie, c'est-à-dire que dans le contexte d'une tâche de comparaison de fractions, ces élèves semblaient systématiquement appliquer la stratégie consistant à considérer que la fraction composée des plus grands nombres est la plus grande, échouant ainsi à mobiliser le contrôle inhibiteur dans ce contexte. Puisqu'il vise notamment à favoriser le contrôle inhibiteur, cet enseignement du concept de neuroplasticité est donc susceptible d'être plus efficace chez ces élèves, qui auraient particulièrement avantage à bénéficier de cette intervention, d'autant plus que les difficultés à inhiber sont fréquemment associées à des difficultés scolaires, notamment en mathématiques (Passolunghi et Siegel, 2004).

Par ailleurs, d'autres études permettent possiblement d'expliquer l'effet plus élevé d'un enseignement du concept de neuroplasticité spécifiquement sur les résultats en mathématiques. En effet, en reprenant le cadre motivationnel de l'état d'esprit de Dweck, une conception plus fixiste des habiletés est particulièrement présente en mathématiques, possiblement parce qu'il s'agit d'une discipline souvent perçue comme nécessitant des aptitudes innées et pour laquelle on croit souvent que certaines personnes sont nées avec un « cerveau-mathématique » tandis que d'autres non, et que de bons résultats ne sont accessibles qu'à certains élèves (Boaler *et al.*, 2018; Issaieva, 2013;

Rattan *et al.*, 2012). D'ailleurs, l'expression « avoir la bosse des maths », provenant de la phrénologie (ancienne discipline aujourd'hui complètement discréditée, consistant à juger des capacités d'un individu en se basant sur la forme de son crâne), reflète cette idée encore répandue qu'il existe une prédisposition aux mathématiques (Baillargeon, 2013). Ainsi, faire évoluer certaines variables motivationnelles chez les élèves, allant d'un état d'esprit plus fixe vers une conception plus dynamique, dans le contexte particulier des mathématiques permettrait probablement de mieux percevoir les effets d'un enseignement du concept de neuroplasticité sur leur mobilisation du contrôle inhibiteur et ultimement sur leur performance.

1.5 Question de recherche

Considérant premièrement que les erreurs fréquentes et persistantes nécessitant le contrôle inhibiteur constituent un obstacle important à la réussite des élèves, mais qu'encore peu d'études se sont penchées sur les stratégies pédagogiques pouvant favoriser sa mobilisation, étudier les effets d'un enseignement du concept de neuroplasticité, stratégie pédagogique prometteuse susceptible de favoriser le contrôle inhibiteur, apparaît grandement pertinent.

Considérant deuxièmement que les effets d'un enseignement du concept de neuroplasticité sur les résultats scolaires sont plus importants chez des élèves à risque, mais que ces effets ne semblent pas avoir été étudiés chez des élèves qui, sans nécessairement être à risque, commettent fréquemment des erreurs dans des tâches qui nécessitent le contrôle inhibiteur, il semble nécessaire de s'intéresser à cette catégorie d'élèves, qui seraient les premiers à bénéficier de cet enseignement.

Considérant troisièmement que des résultats de recherches antérieures ont démontré un plus grand impact de ce type d'enseignement chez les élèves à risque en mathématiques et qu'une conception plus fixiste semble présente dans cette discipline, il apparaît particulièrement pertinent de vérifier les effets de cet enseignement sur les mécanismes liés au contrôle inhibiteur dans le cadre d'une tâche mathématique pour laquelle la nécessité d'inhiber est importante. D'ailleurs, plusieurs recherches indiquent que la capacité à mobiliser le contrôle inhibiteur prédit significativement la performance en mathématiques (pour une revue de la littérature, voir Cragg et Gilmore, 2014). Cette discipline étant souvent problématique pour un grand nombre d'élèves, il apparaît essentiel de s'y intéresser, d'autant plus qu'il est reconnu que l'apprentissage des mathématiques est

fondamental au développement et à l'épanouissement des individus (De Vriendt et Van Nieuwenhoven, 2010) et que les compétences précoces en mathématiques constituent le meilleur prédicteur de la réussite scolaire (Duncan *et al.*, 2007). L'étude des effets d'un enseignement de la neuroplasticité sur certaines variables motivationnelles liées au concept d'état d'esprit apparaît par ailleurs nécessaire, afin de vérifier si les effets sur le contrôle inhibiteur et la performance semblent effectivement modérés par la motivation.

Considérant finalement que les recherches ayant étudié les effets d'un enseignement du concept de neuroplasticité sur la mobilisation des mécanismes cérébraux liés au contrôle inhibiteur l'ont fait dans le cadre de tâches neuropsychologiques et à l'aide de l'électroencéphalographie (Moser *et al.*, 2011; Schroder *et al.*, 2017), il apparaît pertinent d'une part de vérifier si les effets obtenus se transfèrent également à des tâches plus scolaires, et d'autre part d'observer les effets sur le contrôle inhibiteur à l'aide d'une technique d'imagerie différente de celle utilisée dans les recherches antérieures, afin de trianguler les résultats. En effet, comme toute méthodologie utilisée seule comporte des limites, l'idéal est d'en combiner plusieurs et de trianguler les résultats obtenus dans le but de renforcer l'hypothèse avancée. L'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle (IRMf) a donc été ciblée dans cette recherche, également en raison de sa meilleure précision spatiale par rapport à l'EEG et de sa meilleure validité empirique en lien avec le contrôle inhibiteur.

Ainsi, cette thèse propose de répondre à la question suivante : « **Quels sont les effets d'un enseignement du concept de neuroplasticité sur la motivation, la mobilisation du contrôle inhibiteur et la performance à une tâche contre-intuitive en mathématiques?** »

L'utilisation de la neuroimagerie dans ce type de projet permet d'étudier des problématiques éducatives sous un angle plus fondamental en fournissant des données inédites : celles provenant du niveau cérébral. Cette recherche permettra donc non seulement de documenter les effets d'un enseignement de la neuroplasticité, mais également de mieux comprendre *pourquoi* et *comment* cette intervention entraînerait des effets positifs sur le plan comportemental. Elle permettra donc de mettre en lumière de nouvelles connaissances scientifiques quant aux effets d'un enseignement de ce type sur la motivation, la mobilisation du contrôle inhibiteur et la performance à une tâche contre-intuitive en mathématiques.

CHAPITRE II

CADRE THÉORIQUE

Ce chapitre pose les bases théoriques sur lesquelles repose le présent projet de recherche. Comme ce dernier vise à déterminer les effets d'un enseignement du concept de neuroplasticité sur la motivation, la mobilisation du contrôle inhibiteur et la performance à une tâche contre-intuitive en mathématiques, le mécanisme du contrôle inhibiteur sera d'abord présenté, suivi d'une recension des études concernant l'enseignement du concept de neuroplasticité. La principale théorie sous-jacente à la relation entre l'enseignement de la neuroplasticité et la performance, celle de l'état d'esprit, sera également discutée, puis un nouveau modèle théorique de la motivation sera proposé.

2.1 Contrôle inhibiteur

Cette section présente d'abord la définition et la théorie du contrôle inhibiteur, puis fait état du rôle du contrôle inhibiteur dans l'apprentissage des mathématiques. Elle se conclut sur les différentes façons de mesurer ce mécanisme, à la fois au niveau comportemental et cérébral.

2.1.1 Définition et théorie

Tel que mentionné au chapitre précédent, le contrôle inhibiteur constitue l'une des fonctions exécutives, qui sont des fonctions de haut niveau intervenant dans la supervision ou le contrôle de l'activité des différentes régions du cerveau (Ward, 2010). Ces fonctions nous permettent par exemple de réfléchir avant d'agir, de surmonter certains défis ou de rester concentré (Diamond, 2013). Elles exercent un rôle métacognitif dans diverses situations par la prise de décisions stratégiques, en déclenchant ou en freinant, selon le contexte, l'activité d'une région cérébrale (Houdé, 2004). Le contrôle inhibiteur est donc l'une de ces fonctions et consiste, au niveau cognitif, en la capacité à freiner ou à résister aux automatismes de la pensée (Houdé, 2014). Au niveau cérébral, le contrôle inhibiteur représente un mécanisme de correction d'erreurs consistant en la désactivation temporaire d'un réseau de neurones, associé à un automatisme, par un autre réseau de neurones, associé au contrôle inhibiteur (Masson, 2012). Par exemple, lorsqu'on pose la question suivante à des individus : « Que boivent les vaches? », la première réponse qui leur vient

en tête est généralement « du lait ». Cette réponse spontanée constitue un automatisme, selon lequel on associe habituellement la vache avec du lait (Brault Foisy *et al.*, 2015). Bien sûr, la plupart des gens se ravissent rapidement en disant que les vaches boivent de l'eau. Toutefois, pour arriver à freiner cet automatisme et répondre correctement à la question, il est nécessaire de mobiliser le contrôle inhibiteur. Bien qu'elle se fasse en un temps très rapide, cette mobilisation prend tout de même plus de temps (en termes de millisecondes) et plus d'effort cognitif que la réponse spontanée, qui elle ne requiert que très peu d'effort (Diamond, 2013).

S'inspirant des travaux de Siegler (1999), Houdé (2004, 2014) a proposé une théorie du développement et de l'apprentissage alternative à celle des stades de développement de Piaget, soit la théorie du contrôle inhibiteur. Selon cette théorie, le développement se caractériserait davantage par une compétition continue entre différentes stratégies et par la sélection de l'une d'entre elles dans un certain contexte. S'inspirant également des travaux de Kahneman (2011) à l'effet que certaines erreurs reposent sur des intuitions ou des raisonnements automatiques, aussi appelées *heuristiques*, la théorie du contrôle inhibiteur soutient qu'il est nécessaire d'inhiber (c'est-à-dire de freiner ou de résister à) ces formes de pensée intuitive ou automatique afin de surmonter des erreurs fréquentes et persistantes. Ainsi, tout au long du développement, il serait nécessaire de faire un choix, conscient ou non, parmi des stratégies entrant en compétition, c'est-à-dire entre une *heuristique*, stratégie rapide, automatique, nécessitant peu d'effort cognitif, mais menant parfois à une erreur, et un *algorithme*, stratégie plus lente et requérant plus d'effort cognitif, mais plus analytique et toujours appropriée au contexte (et donc menant à la bonne réponse). L'heuristique est cependant utile dans bien des cas : le cerveau serait en constante surcharge s'il ne pouvait s'appuyer sur des automatismes au quotidien, qui sont appropriés dans la plupart des situations. Il existe néanmoins d'autres situations, pouvant être qualifiées de *contre-intuitives*, pour lesquelles l'heuristique est trompeuse et inappropriée au contexte, qui nécessitent la mise en place du contrôle inhibiteur pour résister à cette heuristique (l'automatisme) et mettre en place l'algorithme (le raisonnement approprié). Le processus de développement et d'apprentissage nécessiterait donc à la fois d'inhiber certaines stratégies entrant en compétition dans le cerveau et d'en activer d'autres. Au niveau cérébral, cela consiste à inhiber ou désactiver certains réseaux neuronaux plus automatiques, liés à une heuristique, et à activer d'autres réseaux de neurones moins utilisés et donc plus lents, mais permettant la mise en place d'une stratégie appropriée, liés à l'algorithme.

Ainsi, le mécanisme du contrôle inhibiteur, souvent inconscient, joue un rôle déterminant dans l'apprentissage lors des situations contre-intuitives, qui sont d'ailleurs rencontrées dans de nombreux apprentissages (Houdé et Borst, 2015; Houdé et Leroux, 2009; van den Wildenberg et van der Molen, 2004; Ward, 2010). Cette vision de l'apprentissage propose également qu'une erreur ne serait donc pas systématiquement causée par un manque de logique ou de compétence de la part de l'élève quant à une certaine notion, mais pourrait provenir d'une lacune au niveau du contrôle inhibiteur.

2.1.2 Rôle du contrôle inhibiteur dans l'apprentissage des mathématiques

Bien que le contrôle inhibiteur semble nécessaire lors d'apprentissages dans différents domaines, notamment en lecture et en sciences, il est particulièrement important pour le domaine des mathématiques, qui présente régulièrement des situations contre-intuitives (Cragg et Gilmore, 2014; Gómez *et al.*, 2015; Fischbein et Schnarch, 1997). D'ailleurs, certaines difficultés en mathématiques rencontrées par plusieurs élèves seraient en grande partie prédites par des lacunes sur le plan du contrôle inhibiteur (Bull et Scerif, 2001), bien que d'autres facteurs puissent contribuer à expliquer ces difficultés, tels que la charge cognitive exigée à la mémoire de travail par différentes situations mathématiques. De nombreuses études ont effectivement montré que la capacité à mobiliser le contrôle inhibiteur était associée à la performance en mathématiques en général (Gilmore *et al.*, 2013; Gómez *et al.*, 2015; St Clair-Thompson et Gathercole, 2006), mais également à des tâches spécifiques. Par exemple, des études suggèrent qu'il est nécessaire de surmonter un raisonnement intuitif dans la réussite d'une tâche de conservation du nombre (Houdé *et al.*, 2011), dans le raisonnement probabiliste (Fischbein et Schnarch, 1997), dans certains types de résolution de problèmes (Lubin *et al.*, 2013) et de tâches de raisonnement logique (Houdé *et al.*, 2000), ainsi que dans la comparaison de périmètres de figures (Babai *et al.*, 2010), de nombres à deux chiffres (Macizo, 2017), de dizaines et d'unités (Lubin *et al.*, 2012), de nombres décimaux (Roell *et al.*, 2017) et de fractions (Gómez *et al.*, 2015; Rossi *et al.*, 2019).

Entre autres, Gómez *et al.* (2015) ont mené une étude auprès de 450 élèves de 10 à 12 ans afin de vérifier le lien entre le contrôle inhibiteur, la performance générale en mathématiques ainsi que la comparaison de fractions. Les chercheurs ont mesuré la mobilisation du contrôle inhibiteur des participants à l'aide des taux de réussite et des temps de réponse à une version numérique de la

tâche classique de *Stroop*, reconnue pour mesurer la capacité à mobiliser le contrôle inhibiteur (voir section 2.1.3). Ils ont mesuré la réussite en mathématiques à l'aide d'évaluations attribuées par les écoles des élèves prenant part à la recherche, ainsi que la performance à une tâche de comparaison de fractions. Les résultats montrent d'abord, en cohérence avec les autres études à ce sujet, qu'une plus grande mobilisation du contrôle inhibiteur chez les participants était liée à une plus grande performance aux évaluations en mathématiques ($\beta = -0,45$, $t(421) = -2,7$, $p = 0,007$). Puis, de façon semblable, les résultats démontrent aussi qu'une plus forte mobilisation du contrôle inhibiteur prédisait un plus haut taux d'exactitude lors de la comparaison de fractions ($OR = -0,29$, $z = -3,9$, $p < 0,0001$).

Bien sûr, les difficultés rencontrées par les élèves quant au concept de fraction ne se rapportent pas toutes exclusivement à une difficulté à mobiliser le contrôle inhibiteur. Elles sont en grande partie de nature épistémologique, vu la complexité de la nature même des concepts mathématiques liés aux fractions. Par exemple, l'étude de Hannula (2003) rapporte que 62 % des élèves finlandais de 11 à 13 ans localisent incorrectement la fraction $\frac{3}{4}$ sur une droite numérique allant de 0 à 1. Plusieurs chercheurs (Charalambous et Pitta-Pantazi, 2007; Hannula, 2003; Siegler *et al.*, 2013) suggèrent que ces difficultés peuvent notamment être liées au fait que la compréhension du concept de fraction est par nature complexe (notamment parce qu'une fraction est composée de deux nombres entiers plutôt que d'un seul), et nécessite une compréhension de plusieurs sous-concepts : partie-tout, ratio, opérateur, division et mesure.

Cependant, une difficulté largement documentée inhérente au concept de fractions concerne le fait que les propriétés des nombres rationnels (comme les fractions) sont différentes que celles des nombres naturels (entiers et supérieurs ou égal à 0) (Rossi *et al.*, 2019; Van de Walle et Lovin, 2008). Tel que mentionné au chapitre I, les élèves ont souvent de la difficulté à comparer, par exemple, un quart et un tiers, puisque 4 est plus grand que 3 (Van de Walle et Lovin, 2008). Cette difficulté peut être reflétée par des erreurs fréquentes et persistantes ou par un temps de réponse plus long pour ce type d'item. Alors que l'heuristique (ici, « 4 est plus grand que 3 ») est utile dans la plupart des contextes, ce raisonnement mène à une erreur dans le contexte de la comparaison d'un quart et un tiers. Dans le cas de la comparaison de fractions, il serait donc nécessaire de surmonter l'interférence causée par la tendance à répondre sur la base des propriétés des nombres naturels en mobilisant le contrôle inhibiteur (Rossi *et al.*, 2019). Dans cet exemple, l'élève devrait

donc inhiber l'heuristique « 4 est plus grand que 3 » (de façon consciente ou non) et activer l'algorithme, soit le raisonnement approprié, dans ce cas-ci menant à « un quart est plus petit qu'un tiers ». Tel que mentionné, la difficulté particulière de cette tâche réside dans le fait que les fractions, nombres rationnels, ont des caractéristiques et propriétés différentes des nombres naturels et que les élèves ont donc généralement tendance à transférer aux fractions leur raisonnement lié aux nombres naturels (Gómez *et al.*, 2019; Rossi *et al.*, 2019; Van de Walle et Lovin, 2008; Van Hoof *et al.*, 2013). On réfère généralement à cette tendance par le terme *whole number bias* ou *natural number bias*, biais qui est aujourd'hui largement documenté (Ni et Zhou, 2005; Gómez *et al.*, 2015, 2019; Van Hoof *et al.*, 2013, 2020). Dans le cas des fractions, cela se manifeste par la tendance à interpréter les deux composantes d'une fraction de façon indépendante et ainsi à croire que lorsque l'une des composantes augmente, la valeur de la fraction augmente également (Vamvakoussi *et al.*, 2012). Beaucoup d'élèves ont donc de la difficulté à reconnaître la valeur numérique d'une fraction, car ils ont tendance à la confondre avec les valeurs numériques des nombres qui la composent (Gómez *et al.*, 2019). Comparer la valeur numérique de deux fractions peut donc parfois être qualifié de « contre-intuitif » (par exemple lors de la comparaison d'un quart et un tiers), nécessitant alors probablement de recourir au contrôle inhibiteur pour surmonter la tendance à comparer les composantes des fractions et conclure que le plus grand nombre détermine la fraction la plus grande (Gómez *et al.*, 2015; Meert *et al.*, 2010; Rossi *et al.*, 2019). En effet, plusieurs études appuient l'idée selon laquelle il serait nécessaire d'inhiber cette tendance afin de surmonter l'interférence causée par ce biais (Gómez *et al.*, 2014, 2015; Meert *et al.*, 2010; Rossi *et al.*, 2019).

Par exemple, Meert *et al.* (2010) ont mis en évidence que des élèves de 10 à 12 ans qui réussissaient à comparer correctement des paires de fractions accédaient à la grandeur des fractions entières plutôt que de simplement comparer leurs composantes. Ils ont ensuite voulu vérifier, à l'aide d'un paradigme d'amorçage négatif, si la grandeur du dénominateur interférait tout de même avec leur capacité à comparer la grandeur des fractions. Les résultats montrent que la comparaison de nombres naturels était plus lente lorsque précédée par des paires de fractions avec des numérateurs communs (contre-intuitives) que par des paires avec des dénominateurs communs (intuitives), suggérant le besoin d'inhiber le *natural number bias*, malgré une représentation holistique de la valeur des fractions (accès à la valeur entière). Ce résultat appuie donc la nécessité de recourir au contrôle inhibiteur pour comparer correctement des paires de fractions contre-intuitives, en écartant

la possibilité que ces paires soient moins bien réussies exclusivement parce qu'elles demandent une plus grande charge cognitive (par exemple, passer par la représentation holistique).

De façon similaire, Rossi *et al.* (2019) ont adapté un paradigme d'amorçage négatif pour vérifier si la capacité d'adolescents et d'adultes à comparer des paires de fractions contre-intuitives (ayant un numérateur identique) reposait en partie sur leur capacité à inhiber le *natural number bias*. Les résultats ont montré que les participants prenaient plus de temps à comparer des paires de fractions intuitives (ayant un dénominateur identique) après avoir comparé des paires contre-intuitives, comparativement à un item « neutre » (déterminer laquelle de deux fractions possédait un dénominateur plus grand que le numérateur). Cet effet d'amorçage négatif suggère donc que même les adolescents et adultes doivent inhiber le biais lié aux nombres naturels. Ce biais est d'ailleurs tellement persistant qu'une étude d'Obersteiner *et al.* (2013) l'a même détecté chez des mathématiciens experts, à l'aide de leurs temps de réponse. Cette persistance s'explique possiblement parce que l'automatisme, c'est-à-dire interpréter la valeur des nombres comme on le fait dans le contexte des nombres naturels (4 est plus grand que 3), est efficace et très utile la plupart du temps, ce qui fait en sorte qu'il est constamment renforcé (Rossi *et al.*, 2019).

Ainsi, comme la comparaison de fractions constitue l'un des contextes contre-intuitifs les plus documentés (Gómez *et al.*, 2014, 2015, 2019; Obersteiner *et al.*, 2013; Meert *et al.*, 2010; Rossi *et al.*, 2019; Vamvakoussi *et al.*, 2012) et pour laquelle il a été démontré à de nombreuses reprises qu'elle est mieux réussie lorsque les élèves font preuve de contrôle inhibiteur, cette situation scolaire a été sélectionnée pour le présent projet.

2.1.3 Mesure du contrôle inhibiteur

Plusieurs moyens et outils de collecte de données permettent de mesurer la mobilisation du contrôle inhibiteur chez les individus. Il est d'abord possible d'obtenir un indice comportemental de cette mobilisation chez un individu en mesurant les taux de réussite à une tâche contre-intuitive (ou comportant une interférence) ainsi que les temps de réponse, en millisecondes, entre la présentation d'une question et la réponse du participant. Par exemple, l'une des tâches classiques permettant de mesurer la mobilisation du contrôle inhibiteur est la tâche de *Stroop* (1935), dans laquelle on demande au participant de nommer la couleur de l'encre avec laquelle est écrit un mot, ce dernier

représentant lui-même une couleur. Autrement dit, le mot « rouge » peut être présenté soit en rouge (condition où l'automatisme de la lecture mène à la bonne réponse), soit en bleu (condition où l'automatisme de la lecture mène à une erreur), cette dernière situation causant une interférence. Pour arriver à répondre correctement dans la condition présentant l'interférence (« bleu »), le participant doit résister à la lecture du mot (« rouge ») pour se référer plutôt à la couleur de l'encre avec laquelle il est écrit. Ainsi, dans ce type de situations, les individus doivent mobiliser le contrôle inhibiteur pour surmonter l'interférence. Le premier indice qu'une tâche requiert le contrôle inhibiteur peut être reflété par un taux de réussite supérieur aux items « sans interférence » comparativement aux items « avec interférence ». En effet, comme les items contre-intuitifs sont plus difficiles parce qu'ils sont présumés nécessiter le contrôle inhibiteur, les individus ont tendance à se tromper davantage dans cette condition. Le deuxième indice de contrôle inhibiteur peut être mesuré par la différence dans les temps de réponse entre les items « sans interférence » et « avec interférence » réussis : le fait de devoir inhiber l'automatisme (correspondant dans cette situation à la lecture du mot) pour accéder à la stratégie appropriée (correspondant à nommer la couleur de l'encre avec laquelle le mot est écrit) nécessite plus de temps (en termes de millisecondes), puisqu'il s'agit d'une démarche plus complexe (Babai *et al.*, 2015).

Ainsi, lors de la réalisation d'une tâche de ce type, il est attendu que les taux de réussite soient plus faibles et les temps de réponse plus longs pour les items contre-intuitifs, comparativement aux items intuitifs. Les temps de réponse pris en compte sont ceux pour les réponses *correctes* des participants seulement, puisque l'on considère que la réussite de ces items implique le recours au contrôle inhibiteur et que leur échec signifie que le participant n'a pas réussi à le mobiliser (Vamvakoussi *et al.*, 2012). La mesure des temps de réponse est l'une des méthodologies les plus utilisées en psychologie cognitive (Babai *et al.*, 2015) et il est largement admis qu'ils peuvent fournir une indication des processus neuronaux sous-jacents à la réalisation d'une tâche (Viggiano, 1999), comme la mobilisation du contrôle inhibiteur. En effet, lorsqu'il n'est pas possible de mesurer directement les processus mentaux, il est nécessaire de les inférer à partir d'observations indirectes (p. ex., comportementales ou physiologiques [c.-à-d. relatives au fonctionnement de l'organisme]), comme les temps de réponse. Il s'agit d'un principe fondamental dans le domaine de la cognition humaine (Goldstein, 2019).

Par ailleurs, avec les récentes avancées des technologies de neuroimagerie, de plus en plus de recherches utilisent ces technologies pour étudier des problématiques psychologiques ou éducatives, puisqu'il est possible d'associer la mobilisation de certaines régions cérébrales à différents processus cognitifs (Brault Foisy *et al.*, 2020). En permettant de mieux comprendre pourquoi certaines interventions sont plus efficaces que d'autres sur le plan comportemental, la neuroimagerie permet en effet d'étudier des phénomènes sous un angle plus fondamental en s'intéressant au niveau cérébral (Brault Foisy *et al.*, 2020). Ainsi, en plus des mesures comportementales permettant d'inférer la mobilisation du contrôle inhibiteur, il est aujourd'hui également possible d'obtenir une indication de cette mobilisation au niveau cérébral, en observant ce qui se produit dans le cerveau lorsqu'un raisonnement automatique ou intuitif est inhibé et qu'un raisonnement approprié est activé. L'utilisation de la neuroimagerie permet également d'observer des effets cérébraux qui ne seraient pas suffisants pour se répercuter sur les résultats comportementaux, puisque l'apprentissage est un processus et ne se fait donc pas de façon instantanée. Pour apprendre, il faut en effet d'abord mobiliser les régions cérébrales associées à l'apprentissage à plusieurs reprises pour que l'apprentissage se fasse progressivement (par la création et le renforcement de connexions neuronales), se consolide et finisse par se répercuter au niveau comportemental. Un apprentissage peut donc être en train de se construire dans le cerveau, mais n'être pas encore suffisamment consolidé pour qu'on puisse l'observer au niveau comportemental. Ainsi, la neuroimagerie permet de fournir un niveau de détail qui n'est pas toujours accessible au niveau comportemental, en permettant d'observer les processus cognitifs mobilisés dans le cerveau. On peut donc penser qu'un apprentissage en progression observé à l'aide de la neuroimagerie finira par se consolider suffisamment pour être observé au niveau comportemental.

D'abord, il importe de préciser que ces technologies ont préalablement permis d'identifier quelles régions cérébrales s'activaient davantage lorsque le contrôle inhibiteur était mobilisé, par le biais de tâches neuropsychologiques visant à évaluer le contrôle inhibiteur, telles que la tâche de *Stroop* présentée précédemment. La tâche *Go/no-go* (Menon *et al.*, 2001) et celle nommée *Flanker* (Eriksen et Eriksen, 1974) sont également deux tâches classiques associées au contrôle inhibiteur qui sont souvent utilisées dans les recherches pour fournir une mesure liée au contrôle inhibiteur. En effet, puisqu'un individu doit surmonter une interférence dans ce type de tâche, la

neuroimagerie permet d'observer l'activité cérébrale des régions qui s'activent davantage lors de cette mobilisation du contrôle inhibiteur. À l'aide de ces tâches, les études en imagerie cérébrale ont montré que les régions associées au contrôle inhibiteur sont principalement le cortex cingulaire antérieur (CCA), le cortex préfrontal dorsolatéral (CPDL) et le cortex préfrontal ventrolatéral (CPVL). Le cortex cingulaire antérieur serait davantage associé à la détection d'un conflit ou d'une interférence dans le traitement de l'information (Botvinick, 2007), alors que le cortex préfrontal dorsolatéral permettrait de garder en mémoire de travail et comparer les différentes informations afin de déterminer ce qu'il est nécessaire d'inhiber (Bush *et al.*, 1998). Finalement, le cortex préfrontal ventrolatéral serait davantage responsable de la mobilisation du contrôle inhibiteur en tant que telle (Aron *et al.*, 2014). Ces régions sont représentées sur la figure 2.1.

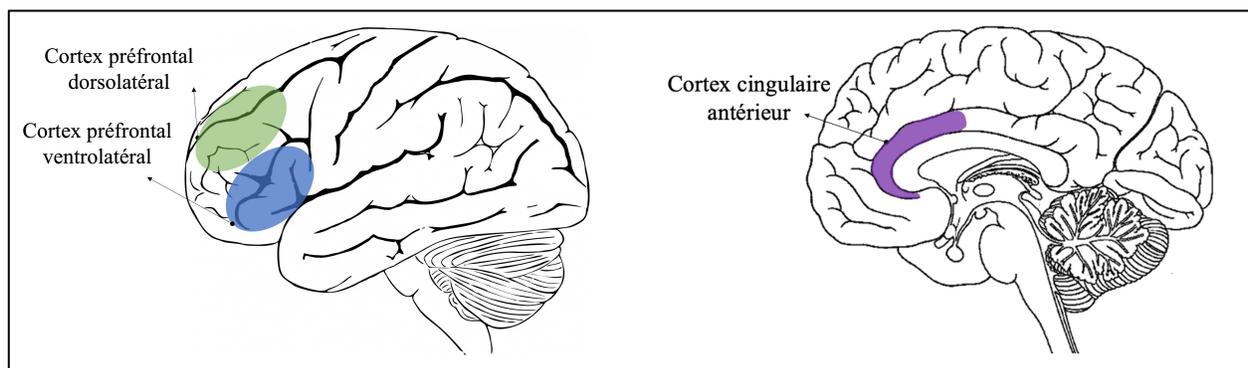


Figure 2.1 Identification des principales régions cérébrales associées au contrôle inhibiteur. La figure de gauche présente une vue externe de l'hémisphère gauche du cerveau. L'image de droite représente une vue de l'intérieur de l'hémisphère droit du cerveau.

Ainsi, lorsqu'une plus grande activation est mesurée dans ces régions lors d'une tâche que l'on présume nécessiter du contrôle inhibiteur (en l'occurrence, une tâche de comparaison de fractions), il est possible d'inférer que cette activation reflète possiblement cette mobilisation du contrôle inhibiteur. Dédire de cette façon un processus cognitif particulier à partir de l'activation d'une région cérébrale spécifique au cours d'une tâche est un raisonnement que l'on qualifie d'inférence inverse, fréquemment utilisé en recherche, puisque la mesure explicite de processus cognitifs n'est pas réalisable (Aguirre, 2003; Hutzler, 2014; Poldrack, 2006). Cette pratique n'est d'ailleurs pas propre aux études en neuroimagerie; des inférences inverses sont régulièrement faites dans les études lorsqu'on déduit un processus cognitif particulier à partir de mesures comportementales,

telles que les temps de réponse, par exemple. Toutefois, il est important de garder en tête que la validité de l'interprétation faite à partir d'une inférence inverse dépend grandement de la qualité de la tâche utilisée, du processus cognitif étudié ainsi que, dans le cas de la neuroimagerie, de la spécificité de la région cérébrale étudiée (Hutzler, 2014; Poldrack, 2006). Bien qu'il soit sans conteste nécessaire de faire preuve de prudence lors d'une telle interprétation, une utilisation rigoureuse de cette pratique peut fournir des informations riches et offrir un pouvoir prédictif élevé (Hutzler, 2014). Afin de pallier au mieux les erreurs possibles d'interprétation des résultats obtenus dans la présente recherche, à la fois l'IRMf et les temps de réponse ont été utilisés pour inférer et trianguler les données en lien avec le contrôle inhibiteur.

2.2 Effets d'un enseignement du concept de neuroplasticité

Cette section présente une recension des recherches sur la relation entre un enseignement du concept de neuroplasticité et ses effets aux niveaux cérébral et comportemental. Puis, comme la plupart de ces recherches ont expliqué les effets de l'enseignement par la variable intermédiaire que représenterait l'état d'esprit, la théorie de l'état d'esprit et les recherches empiriques à son sujet sont discutées. À la lumière des réflexions exposées sur le rôle de la théorie de l'état d'esprit dans ce phénomène, un nouveau modèle explicatif concernant la motivation est finalement proposé.

2.2.1 Relation entre un enseignement du concept de neuroplasticité, les mécanismes cérébraux et la performance

Tel qu'il a été mentionné au chapitre I, des recherches récentes ont suggéré que le fait d'enseigner aux élèves comment fonctionne leur cerveau, notamment par le biais du concept de neuroplasticité, pourrait être une stratégie intéressante pour favoriser la mobilisation du contrôle inhibiteur et ultimement la performance, particulièrement lors d'une tâche contre-intuitive (Moser *et al.*, 2011; Schroder *et al.*, 2014, 2017).

La neuroplasticité réfère à la capacité du cerveau à modifier ses connexions neuronales (Kania *et al.*, 2017). Elle est fondamentale dans tout apprentissage, car ce sont ces modifications entre les connexions neuronales qui permettent l'apprentissage. En effet, lorsqu'on apprend, les connexions entre nos neurones changent : certaines peuvent se former et se renforcer, d'autres s'affaiblir ou

même disparaître. En fait, pour apprendre, les connexions neuronales doivent se modifier. Apprendre n'est donc pas simplement un phénomène cognitif ou psychologique, mais est avant tout un processus biologique. Le principe central qui permet d'expliquer comment s'opèrent ces modifications entre les connexions neuronales, proposé par Hebb (1949), est le suivant : les neurones qui s'activent ensemble se connectent ensemble. Autrement dit, lorsque des neurones près l'un de l'autre s'activent de façon simultanée et répétée, ils se connectent l'un à l'autre. Cela augmente ensuite les probabilités qu'ils s'activent à nouveau ensemble, renforçant ainsi leurs connexions, et ainsi de suite. C'est donc l'activation répétée des neurones liés à un apprentissage qui renforce leurs connexions neuronales et, plus ces connexions s'activent et se renforcent, plus elles deviennent efficaces (Geake et Cooper, 2003). Dans certains cas, afin d'activer les neurones liés à l'apprentissage visé, il peut aussi être nécessaire d'inhiber certains neurones liés à des automatismes ou des intuitions, qui ont tendance à s'activer spontanément, mais qui mèneraient à une erreur dans ce contexte. Ainsi, plus on s'entraîne à inhiber des connexions neuronales menant à des erreurs dans un contexte contre-intuitif, plus on facilite l'activation des neurones appropriés à ce contexte. Au niveau comportemental, activer les neurones liés à un apprentissage de façon répétée signifie s'entraîner à cet apprentissage : se pratiquer, mettre des efforts, récupérer en mémoire, utiliser des stratégies pertinentes, etc. En renforçant nos connexions neuronales de cette façon, elles deviennent plus efficaces, c'est ce qui explique que l'on s'améliore pour cet apprentissage.

Ainsi, les mécanismes de neuroplasticité sont très près de l'idée selon laquelle il est possible d'améliorer ses habiletés (Maguire *et al.*, 2000) puisqu'en fait, ils expliquent pourquoi et comment il est possible de le faire. Comme l'apprentissage se fait avant tout dans le cerveau, il semble raisonnable de penser que mieux comprendre la façon dont on apprend (notamment par le biais des mécanismes de neuroplasticité) et la façon dont on peut influencer cette neuroplasticité pourrait faciliter l'apprentissage. Cette section détaille d'ailleurs les recherches ayant observé qu'un enseignement de la neuroplasticité peut aller jusqu'à favoriser la mobilisation de mécanismes de correction d'erreurs, comme le contrôle inhibiteur. Ainsi, non seulement il apparaît pertinent de réaliser un tel enseignement auprès des élèves, mais en plus, enseigner la neuroplasticité n'a pas besoin d'être complexe ni laborieux. En effet, plusieurs recherches l'ont fait à l'aide d'interventions plutôt simples et de courtes durées, par exemple simplement par la lecture d'un court texte ou par

un atelier de vulgarisation sur le cerveau de moins d'une heure (Schroder *et al.*, 2014; Yeager *et al.*, 2019). L'important serait de transmettre aux élèves l'idée selon laquelle le renforcement des connexions entre les neurones mène à une amélioration des habiletés et qu'il est possible d'influencer ce renforcement par la pratique, l'effort et l'utilisation de stratégies appropriées.

Les recherches ayant étudié le lien entre un enseignement du concept de neuroplasticité, les mécanismes cérébraux et la performance sont détaillées dans cette section.

D'abord, une méta-analyse réalisée en 2018 (Blanchette Sarrasin *et al.*) a recensé sept recherches ayant étudié l'effet d'un enseignement du concept de neuroplasticité sur les résultats scolaires. Parmi ces recherches, on retrouve cinq tailles d'effet disponibles concernant les résultats scolaires de façon générale, cinq tailles d'effet concernant les résultats en lecture et huit tailles d'effet relatives aux résultats en mathématiques. En regroupant les tailles d'effet des études incluses (Aronson *et al.*, 2002; Blackwell *et al.*, 2007; Dommert *et al.*, 2013; Good *et al.*, 2003; Lanoë *et al.*, 2015; Sriram, 2014; Yeager *et al.*, 2016) portant sur les résultats scolaires d'élèves à risque et non à risque, la méta-analyse obtient une taille d'effet globale (g , soit la taille d'effet corrigée pour la taille des échantillons) moyenne de 0,34. Tel que mentionné au chapitre I, les « élèves à risque » dans cette méta-analyse représentaient ceux présentant des facteurs de vulnérabilité, comme un faible statut socioéconomique ou une appartenance à une minorité visible. L'effet est toutefois légèrement modéré par le statut des élèves, puisque la taille d'effet globale pour les élèves à risque est de 0,39 et celle pour les élèves n'étant pas à risque est de 0,28. Le résultat le plus fort est par ailleurs retrouvé auprès des élèves à risque, mais spécifiquement en mathématiques. En effet, une grande taille d'effet est observée chez ces élèves dans ce domaine, soit 0,78, comparativement aux élèves non à risque dans ce même domaine (0,09). Bien que ces résultats soient hétérogènes, indiquant une efficacité de l'intervention dans certains cas seulement, et bien qu'il soit nécessaire de rester prudent dans leur interprétation notamment en raison du faible nombre d'études incluses dans cette méta-analyse, un enseignement du concept de neuroplasticité semble constituer une intervention efficace pour favoriser l'adoption de *comportements orientés vers un but*, principalement dans le cas des élèves à risque, en mathématiques.

Une recherche plus récente, celle de Yeager *et al.* (2019), a voulu évaluer les effets d'une courte intervention informatisée (moins d'une heure) sur les résultats scolaires, enseignant aux élèves que

le cerveau se développe et s'améliore par les expériences d'apprentissage. L'échantillon était constitué de 6 320 élèves de neuvième année ayant des résultats inférieurs à la norme, se voulant représentatif de cette population d'élèves du secondaire aux États-Unis. Les résultats de cette étude d'envergure ayant utilisé une méthodologie des plus rigoureuses montrent que les résultats scolaires des élèves se sont effectivement améliorés après qu'ils aient suivi l'intervention ($d = 0,11$; $p = 0,001$), en plus de favoriser l'inscription à des cours de mathématiques avancées. Bien qu'une taille d'effet de 0,11 puisse sembler modeste, il s'agit tout de même d'une taille notable dans le contexte d'une étude à grande échelle en situation réelle (Kraft, 2020). En effet, dans le cadre de la recherche de Yeager *et al.*, leur modèle estime que l'intervention préviendrait l'échec scolaire de 5,3 % des élèves ayant des résultats inférieurs à la norme (passant de 46 % à 41 %), ce qui correspond à une réduction relative du risque de 11 % chez cette catégorie d'élèves (0,05/0,46). Ce résultat n'est pas négligeable, particulièrement pour une intervention aussi courte et peu coûteuse.

À notre connaissance, une seule étude a effectué un enseignement s'approchant du concept de neuroplasticité pour observer, à l'aide de la neuroimagerie, les effets sur les mécanismes cérébraux. En effet, en 2014, Schroder *et al.* ont demandé à leurs participants adultes du groupe expérimental de lire un court texte expliquant que les habiletés se développaient par l'environnement, l'effort et l'apprentissage plutôt que par les gènes. À l'aide de l'électroencéphalographie (EEG), les chercheurs ont observé de quelle façon le cerveau des participants réagissait à une erreur lors d'une tâche mesurant le contrôle inhibiteur (version « lettres » de la tâche *Flanker*). Les résultats montrent que les participants ayant reçu l'enseignement portaient davantage attention aux items présentés dans la tâche après avoir commis une erreur (reflétée par une différence significative de signal en P3 [composante régulièrement associée à l'attention], $p < 0,05$), comparativement aux participants du groupe contrôle. Cette différence était également corrélée à un ajustement de la performance des participants du groupe expérimental après une erreur.

Comme mentionné au chapitre précédent, la grande majorité des recherches ayant étudié le lien entre un enseignement de la neuroplasticité, les mécanismes cérébraux et la performance ont expliqué cette relation à l'aide de la théorie de l'état d'esprit. En effet, l'enseignement de la neuroplasticité renforcerait un état d'esprit dynamique, soit essentiellement l'idée qu'il est possible d'améliorer ses habiletés, puis ce *mindset* influencerait conséquemment la réaction des élèves lorsqu'ils commettent une erreur, soit d'activer davantage des mécanismes de correction d'erreur

que les élèves à l'état d'esprit plus fixe, qui eux auraient davantage tendance à se décourager et ainsi fournir moins d'effort.

Bien que Schroder *et al.* (2014) semblent être les seuls à avoir étudié l'impact de ce type d'enseignement spécifiquement sur les mécanismes cérébraux, d'autres recherches permettent tout de même d'éclairer la compréhension du phénomène au niveau cérébral. En effet, à notre connaissance, quatre recherches ont étudié les mécanismes cérébraux associés à un état d'esprit fixe ou dynamique, sans qu'un enseignement ne soit toutefois effectué (Mangels *et al.*, 2006; Moser *et al.*, 2011; Myers *et al.*, 2016; Schroder *et al.*, 2017). Autrement dit, ces recherches ont évalué l'état d'esprit des participants et les ont classés en deux groupes selon leur conception fixe ou dynamique. Ils ont ensuite observé les mécanismes cérébraux liés à chacune de ces croyances. Les résultats de trois de ces études (Mangels *et al.*, 2006; Moser *et al.*, 2011; Schroder *et al.*, 2017) montrent, également à l'aide de l'EEG, que les participants détenant un état d'esprit dynamique portent davantage leur attention sur les éléments pertinents à la tâche (tels que les items présentés, la rétroaction corrective fournie ou leur erreur), comparativement aux participants du groupe contrôle, ce qui mènerait à une augmentation de leur performance après avoir commis une erreur. La dernière recherche (Myers *et al.*, 2016) a utilisé une autre technique de neuroimagerie, l'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle (IRMf), afin de vérifier la connectivité entre certaines régions du cerveau chez les individus détenant un état d'esprit dynamique. À l'intérieur de l'appareil, les participants demeuraient à l'état de repos et n'effectuaient aucune tâche. Les résultats montrent une plus grande connectivité entre certaines régions chez ces participants (notamment entre le striatum et des réseaux préfrontaux, tels que ceux liés au cortex cingulaire antérieur), connectivité étant associée aux mécanismes de correction d'erreurs. Ainsi, de façon générale, il semble que le phénomène soit en partie expliqué par une plus grande attention portée soit à la rétroaction, soit aux stimuli après une erreur chez les individus détenant un état d'esprit dynamique, ce qui mènerait à un meilleur encodage en mémoire, l'utilisation de stratégies correctives et un ajustement de la performance. Ultiment, cette correction d'erreurs mènerait à une augmentation des taux de réussite et des résultats scolaires.

Somme toute, ces recherches suggèrent qu'enseigner aux élèves le fonctionnement de leur cerveau constitue une intervention intéressante pour favoriser la mobilisation du contrôle inhibiteur, et, ultimement, la performance dans une tâche contre-intuitive. En effet, elles montrent que lors d'une

erreur, les individus ayant un état d'esprit dynamique portent davantage leur attention sur les éléments pertinents (comme la rétroaction reçue indiquant l'erreur commise), de sorte qu'ils mobilisent davantage des mécanismes cérébraux de correction d'erreurs, dont ceux liés au contrôle inhibiteur. Comme l'état d'esprit constitue la variable communément utilisée pour expliquer la relation entre un enseignement de la neuroplasticité et le contrôle inhibiteur et la performance, il convient de se pencher plus attentivement sur ce concept et sur les recherches ayant étudié ses effets de façon plus détaillée.

2.2.2 Principale théorie sous-jacente à l'enseignement du concept de neuroplasticité : l'état d'esprit

Selon les théories implicites de Dweck (2000, 2006, 2017; voir aussi Dweck et Leggett, 1988; Dweck et Sorich, 1999) abordées au chapitre précédent, l'état d'esprit est un concept qui pourrait se représenter sur un continuum dont les deux pôles sont les suivants : un état d'esprit fixe (*fixed mindset*) et un état d'esprit dynamique (*growth mindset*). À l'extrémité d'un pôle se situent les élèves qui détiennent un état d'esprit fixe, qui consiste à croire que les habiletés sont des traits fixes, stables et qui n'évoluent pas dans le temps. À l'autre extrémité du continuum, on retrouve les élèves ayant un état d'esprit dynamique, soit la croyance selon laquelle les habiletés se développent, notamment par la pratique, l'effort et l'utilisation de stratégies appropriées. D'après ce cadre de référence, la conception qu'a un élève de ses habiletés et compétences, à savoir s'il les perçoit comme plus ou moins modulables, influencerait sa réaction face à l'erreur. En effet, lorsqu'on informe l'élève ayant un état d'esprit plutôt fixe qu'il a commis une erreur, comme il croit qu'il ne peut pas vraiment s'améliorer, il aurait tendance à percevoir cette erreur comme la confirmation d'une incapacité à réaliser la tâche demandée et donc à se désengager. Un état d'esprit plus dynamique aurait à l'inverse un effet positif sur la réaction de l'élève lorsqu'il reçoit une rétroaction négative; puisqu'il croit qu'il peut s'améliorer, il percevrait son erreur davantage comme une opportunité d'améliorer ses habiletés et compétences et donc comme un défi à relever (Dweck, 2000; Dweck et Leggett, 1988).

Les recherches présentées à la section précédente mettent d'ailleurs en lumière le rôle que l'état d'esprit occuperait en tant que variable intermédiaire dans la relation entre un enseignement de la neuroplasticité, certains comportements orientés vers un but (notamment la mobilisation du

contrôle inhibiteur) et la performance, notamment par l'impact positif d'un état d'esprit dynamique sur les mécanismes de correction d'erreurs, dont ceux liés au contrôle inhibiteur (Moser *et al.*, 2011; Schroder *et al.*, 2014, 2017). Cette mobilisation du contrôle inhibiteur entraînerait de meilleurs taux de réussite à la tâche, ce qui se répercuterait même sur certains résultats scolaires, notamment en lecture et en mathématiques (Blackwell *et al.*, 2007; Lanoë *et al.*, 2015).

Or, bien que cette théorie semble expliquer de façon plutôt cohérente ce phénomène, elle ne fait toujours pas consensus au sein de la communauté scientifique, des résultats contradictoires émergeant régulièrement (Bahník et Vranka, 2017; Dommert *et al.*, 2013; Glerum *et al.*, 2018; Li et Bates, 2017; Miller, 2019).

Par exemple, une autre méta-analyse que celle décrite dans la section précédente a étudié un phénomène semblable (Sisk *et al.*, 2018). Toutefois, plutôt que d'étudier les effets spécifiques d'un enseignement du concept de neuroplasticité, elle s'est intéressée aux effets plus généraux d'une intervention visant à favoriser un état d'esprit dynamique sur les résultats scolaires. Autrement dit, l'intervention étudiée par les recherches incluses dans la méta-analyse n'abordait pas explicitement l'enseignement de la neuroplasticité ou du fonctionnement cérébral, mais visait de façon plus générale à induire un état d'esprit plus dynamique chez les élèves, par exemple en expliquant que les habiletés ou l'intelligence sont malléables et peuvent se développer, notamment par l'effort. Cette méta-analyse comportait 29 études, dont plusieurs n'ont pas été publiées (les auteurs les ayant obtenues en contactant directement différents chercheurs). La taille d'effet globale obtenue est faible, soit de 0,08, mais les résultats les plus négatifs proviennent majoritairement des études n'ayant pas été publiées. Comme les études non publiées n'ont pas été révisées par les pairs, mais sont incluses dans la taille d'effet, il est possible que cette taille d'effet sous-estime l'ampleur de l'effet des interventions. De plus, les résultats montrent que certains modérateurs sont significatifs. En effet, bien qu'il faille de nouveau faire preuve de prudence dans l'interprétation de ces résultats, notamment en raison de certaines petites tailles d'échantillon, l'effet de l'intervention semble plus efficace pour les élèves étant considérés hautement à risque, soit de 0,19, et pour les élèves ayant un statut socioéconomique faible, soit de 0,39. Aucune analyse n'a été effectuée afin d'observer les différences entre les différents domaines d'apprentissage. Ainsi, les auteurs concluent qu'une intervention visant à favoriser un état d'esprit dynamique a un effet faible, mais plus efficace pour certains sous-groupes d'élèves, comme ceux à risque ou à faible statut socioéconomique.

Cependant, un élément important mis en lumière par cette méta-analyse mérite notre attention. Parmi toutes les études incluses, 35 % d'entre elles n'ont pas fait de vérification de manipulation (*manipulation check*), c'est-à-dire qu'elles n'ont pas vérifié si l'état d'esprit des élèves avait bel et bien évolué vers un état d'esprit plus dynamique après l'intervention. Or, l'effet de l'intervention sur la réussite pour ces études était significatif ($p = 0,005$, $d = 0,18$), alors qu'il ne l'était pas pour les études ayant fait cette vérification ($p = 0,249$, $d = 0,04$). En d'autres mots, les recherches n'ayant pas vérifié si l'état d'esprit avait bel et bien été influencé par l'intervention montraient un effet significatif sur la réussite, alors que celles ayant vérifié le changement dans l'état d'esprit suite à l'intervention n'ont pas observé d'effet significatif sur la réussite. La différence entre ces deux catégories d'études était d'ailleurs significative ($p = 0,047$). De façon encore plus intrigante, parmi les études ayant réalisé une vérification de manipulation, près de la moitié d'entre elles (46 %) n'ont pas observé de changement dans l'état d'esprit des élèves après l'intervention, alors que l'effet de leur intervention sur les résultats scolaires était significatif ($p = 0,044$, $d = 0,05$). Plus encore, les études ayant bel et bien observé un changement dans l'état d'esprit des élèves n'ont pas été en mesure de déceler un effet significatif de l'intervention sur les résultats scolaires ($p = 0,771$). Deux conclusions se dégagent donc de ces résultats : d'une part, les interventions utilisées pour favoriser un état d'esprit dynamique ne semblent pas avoir eu d'impact sur l'état d'esprit, et d'autre part, elles semblent toutefois avoir eu des effets significatifs sur les résultats scolaires. Cela signifierait donc que les effets positifs des interventions sur les résultats scolaires ne sont peut-être pas expliqués par l'état d'esprit des élèves en tant que tel, mais plutôt par une autre variable possiblement encore inconnue.

Cette explication apparaît plutôt cohérente, d'autant plus que plusieurs études ont soulevé des limites parfois importantes aux questionnaires utilisés pour évaluer l'état d'esprit des participants. Par exemple, au sein de certains questionnaires, des énoncés évoquent les capacités des individus en général (p. ex., « Pour être intelligent, il faut avoir certaines qualités dès la naissance »), alors que d'autres réfèrent directement à l'élève qui répond au questionnaire (p. ex., « Ton intelligence s'améliore obligatoirement en travaillant ») (Da Fonseca *et al.*, 2007). Selon Issaieva (2013), cette opérationnalisation pose un problème méthodologique, car la perception relative à soi-même peut différer de la perception d'une qualité de manière générale. Une autre critique concerne les questionnaires dont les énoncés réfèrent à tous les domaines de façon générale, sans distinction

selon les matières (Chen et Pajares, 2010). En effet, les élèves peuvent détenir un état d'esprit différent selon la matière, par exemple croire qu'ils peuvent s'améliorer en français et non en mathématiques. L'étude de Issaieva (2013) a également démontré des croyances différentes par rapport à l'utilité de l'effort au sein des participants ayant été jugés détenir un état d'esprit fixe. En effet, parmi ceux-ci, deux sous-groupes se distinguaient clairement : les participants jugeant qu'il est souhaitable de faire des efforts, même pour les élèves ayant une intelligence innée, puis les participants estimant que l'effort est inutile et n'aide pas à mieux réussir, qui pensent alors détenir peu de contrôle sur leur réussite.

Par ailleurs, une autre limite des questionnaires sur l'état d'esprit est liée à l'utilisation du terme « intelligence » dans plusieurs d'entre eux, susceptible de poser problème puisqu'il peut être associé à des conceptions considérablement différentes chez chaque élève. En effet, une étude de Limeri *et al.* (2020) a observé que certains interprètent le mot « intelligence » en termes de connaissances, d'autres en termes d'habiletés. D'autres encore ont mentionné avoir de la difficulté à répondre au questionnaire sans savoir sur quelle définition de l'intelligence s'appuyer. Ainsi, ces questionnaires risquent de ne pas évaluer de façon valide et fiable les conceptions des élèves quant à l'intelligence. Finalement, certains questionnaires ne comportent que des items visant à évaluer un état d'esprit dynamique, et d'autres comportent des items évaluant un état d'esprit dynamique et des items évaluant un état d'esprit fixe, en inversant les scores de l'un pour obtenir un score global unique (p. ex., García-Cepero et McCoach, 2009). Cette pratique a toutefois soulevé des controverses, car certaines recherches, en mesurant à la fois une conception dynamique et une conception fixe à l'aide d'énoncés distincts, ont constaté que ces deux construits n'étaient pas toujours corrélés négativement, c'est-à-dire qu'ils ne semblaient pas représenter l'inverse l'un de l'autre (Dupeyrat et Mariné, 2004; Vezeau *et al.*, 2004). Or, selon la théorie de l'état d'esprit, un état d'esprit dynamique constituerait l'inverse ou l'opposé d'un état d'esprit fixe. Il est donc possible que les questionnaires utilisés pour mesurer l'état d'esprit ne mesurent pas nécessairement ce qu'ils sont censés mesurer, peut-être parce que plusieurs idées possiblement distinctes semblent intégrées comme un tout dans les questionnaires (intelligence, connaissances, habiletés, perception de contrôle, rôle de l'effort, perception de l'erreur, etc.).

En ce sens, des chercheurs soulignent que, plus que la théorie de l'état d'esprit, l'idée de perception de compétence (ou sentiment d'autoefficacité; Bandura, 1977) prédirait plus exactement la

performance (Chen et Pajares, 2010; Dupeyrat et Mariné, 2004; Kennett et Keefer, 2006). La perception de compétence fait référence à l'évaluation qu'un individu fait de ses capacités à réussir une tâche ou une activité (Fréchette-Simard *et al.*, 2019). En effet, on retrouve parfois dans la théorie de l'état d'esprit cette idée de « croire que je suis capable de réussir la tâche ». Cependant, croire que l'on est en mesure de réussir une tâche aujourd'hui est différent de croire que l'on pourra éventuellement s'améliorer dans cette tâche et la réussir dans le futur. Ainsi, comme les questionnaires visant à évaluer l'état d'esprit semblent parfois intégrer différents concepts motivationnels, tels que la perception de compétence ou de contrôle, sans nécessairement les distinguer entre eux et que cela risque d'engendrer de la variabilité non désirée dans les données, il semble nécessaire de les dissocier.

2.2.3 Proposition d'un nouveau modèle de la motivation

À partir de la littérature et des questionnaires sur l'état d'esprit, nous avons identifié quatre construits motivationnels qui, bien qu'interreliés, comportent des distinctions sur le plan sémantique. Le premier réfère à l'idée centrale de la théorie de l'état d'esprit, soit la croyance que les habiletés se développent et sont malléables, construit que nous nommerons *Perception de la malléabilité des habiletés*. Cette idée se distingue de la *Perception de contrôle* qu'a l'élève sur sa réussite, c'est-à-dire s'il croit avoir du contrôle ou du pouvoir sur les causes de sa réussite (Fréchette-Simard *et al.*, 2019). Un autre concept souvent intégré dans les questionnaires sur l'état d'esprit concerne la *Perception de l'erreur*, soit la croyance que l'erreur peut être un outil pour apprendre ou, au contraire, une confirmation d'incapacité ou de manque d'habiletés. Finalement, comme il a été mentionné plus haut, la *Perception de compétence* se distingue des autres construits, car elle réfère davantage à la croyance de l'élève par rapport à sa capacité à réussir la tâche à un moment précis (Fréchette-Simard *et al.*, 2019). Le tableau 2.1 présente ces quatre construits ainsi que le continuum sur lequel un élève peut se situer pour chacun d'entre eux.

Tableau 2.1 Continuum sur lequel peuvent se situer les perceptions des élèves quant aux quatre construits motivationnels identifiés

Continuum	←	→
Perception de la malléabilité des habiletés :	Faible <i>(Je ne peux pas m'améliorer)</i>	Élevée <i>(Je peux m'améliorer)</i>
Perception de contrôle :	Faible <i>(Je n'ai pas de contrôle sur ma réussite)</i>	Élevée <i>(J'ai du contrôle sur ma réussite)</i>
Perception de l'erreur :	Négative <i>(Elle confirme mon incapacité à réussir)</i>	Positive <i>(Elle m'aide à apprendre et à m'améliorer)</i>
Perception de compétence :	Faible <i>(Je ne suis pas capable de réussir la tâche)</i>	Élevée <i>(Je suis capable de réussir la tâche)</i>

Dans la théorie de l'état d'esprit, on semble tenir pour acquis que si un élève a une conception plus fixe, il se situerait également à l'extrême gauche de tous les continuums. Il aurait donc nécessairement une faible perception de contrôle, une perception négative de l'erreur ainsi qu'une faible perception de compétence. Or, cela ne semble pas toujours être le cas. Par exemple, un élève peut avoir une perception des habiletés plutôt fixe, donc penser que les habiletés ne se développent pas (ou peu), mais croire qu'elle possède un grand talent pour les langues. Elle pourrait également ne pas croire particulièrement à l'utilité de l'effort ni de l'erreur et penser que si un élève doit fournir des efforts ou fait des erreurs, c'est qu'il n'est pas suffisamment bon. Elle pourrait finalement s'attendre à bien performer dans une tâche liée aux langues (perception de compétence élevée), sans avoir à mettre d'effort. Ses expériences antérieures, sur lesquelles sont notamment basées ses croyances (Reeve, 2018), pourraient en effet lui avoir démontré que même en fournissant très peu d'effort, elle excelle dans le domaine des langues. Ainsi, il est fort probable que cette élève performera effectivement plutôt bien à la tâche, malgré un état d'esprit plutôt fixe. Comme la position à laquelle un élève se trouve sur le continuum de chacun de ces construits peut varier d'une tâche à l'autre et même d'une journée à l'autre, un autre élève pourrait penser qu'il pourra éventuellement s'améliorer dans une tâche en mathématiques (perception malléable des habiletés),

mais croire qu'il ne s'est pas encore suffisamment amélioré pour réussir la tâche aujourd'hui même (perception de compétence faible face à cette tâche à ce moment précis).

L'idée selon laquelle un élève puisse se situer à différents niveaux sur le continuum de chaque construit pourrait donc peut-être expliquer, du moins en partie, les résultats divergents ou contradictoires dans les études sur l'état d'esprit. À notre avis, cette distinction entre ces quatre construits pourrait possiblement permettre de prédire de façon plus précise la motivation de l'élève à s'engager ou non dans une tâche.

La théorie de l'état d'esprit a en effet été élaborée dans le but d'expliquer pourquoi certains élèves se découragent et abandonnent devant des erreurs alors que d'autres les perçoivent comme des défis à relever et s'engagent dans la tâche de plein gré. La question qui se pose est donc la suivante : qu'est-ce qui mène l'élève à décider de s'engager dans la tâche, de fournir les efforts requis pour accomplir cette tâche? Les recherches sur le cerveau indiquent que, de façon générale et pour tout comportement, le cerveau fait une analyse coûts-bénéfices afin de déterminer s'il vaut la peine d'adopter un comportement (Kramer *et al.*, 2020). En d'autres mots, il évalue si les bénéfices potentiels, par exemple réussir un examen ou simplement s'améliorer, valent les coûts nécessaires à l'atteinte de ces bénéfices, comme l'effort cognitif requis pour étudier. Bien entendu, cette analyse doit également tenir compte de la possibilité de réussite (ou d'atteinte des bénéfices) perçue par l'élève, en fonction des coûts qu'il estime devoir investir. La balance de cette analyse détermine ainsi si l'individu s'engagera dans le comportement ou non.

La valeur des coûts et des bénéfices est quant à elle influencée par différents facteurs, comme le moment de la journée ou le niveau de fatigue de l'individu, ainsi que l'utilité et l'importance qu'il accorde à l'activité, tout comme l'intérêt et le plaisir ressentis en la réalisant (Eccles et Wigfield, 2002; Kool et Botvinick, 2018). Dans le contexte d'un élève à qui on demande de réaliser une tâche scolaire, le cerveau de l'élève réalise donc cette analyse coûts-bénéfices : « Considérant les probabilités que je réussisse la tâche, les efforts et le temps que je dois investir pour la réussir valent-ils les bénéfices potentiels (valeur accordée à la réussite de la tâche)? » Le résultat de cette analyse déterminera le niveau d'engagement de l'élève dans la tâche; s'il croit que les efforts sont non seulement suffisants pour réussir la tâche, mais que la valeur de cette réussite surpasse également les coûts à investir, son engagement sera plus élevé, il mettra plus d'efforts, sera plus

attentif, mobilisera davantage le contrôle inhibiteur, utilisera diverses stratégies et fera preuve de persévérance devant les difficultés, soit des *comportements orientés vers un but*, qui augmentent les probabilités de réussite (Reeve, 2018). À l'inverse, s'il croit que les efforts investis n'en valent pas la peine, soit parce qu'il estime une faible probabilité de réussite, soit parce que la valeur des bénéfices est trop faible à ses yeux, il choisira probablement de ne pas s'engager, car cela constituerait une dépense énergétique inutile. Afin de favoriser l'engagement de l'élève dans la tâche, il s'agirait donc de minimiser les coûts nécessaires perçus par l'élève tout en maximisant la valeur des bénéfices potentiels, mais il est également primordial que l'élève juge qu'il est en mesure d'accomplir la tâche s'il fournit les efforts requis.

Cette analyse coûts-bénéfices est donc influencée par un grand nombre de facteurs, incluant l'ensemble de croyances lié aux quatre construits présentés précédemment. Un modèle émergent de ces réflexions est présenté à la figure 2.2 :

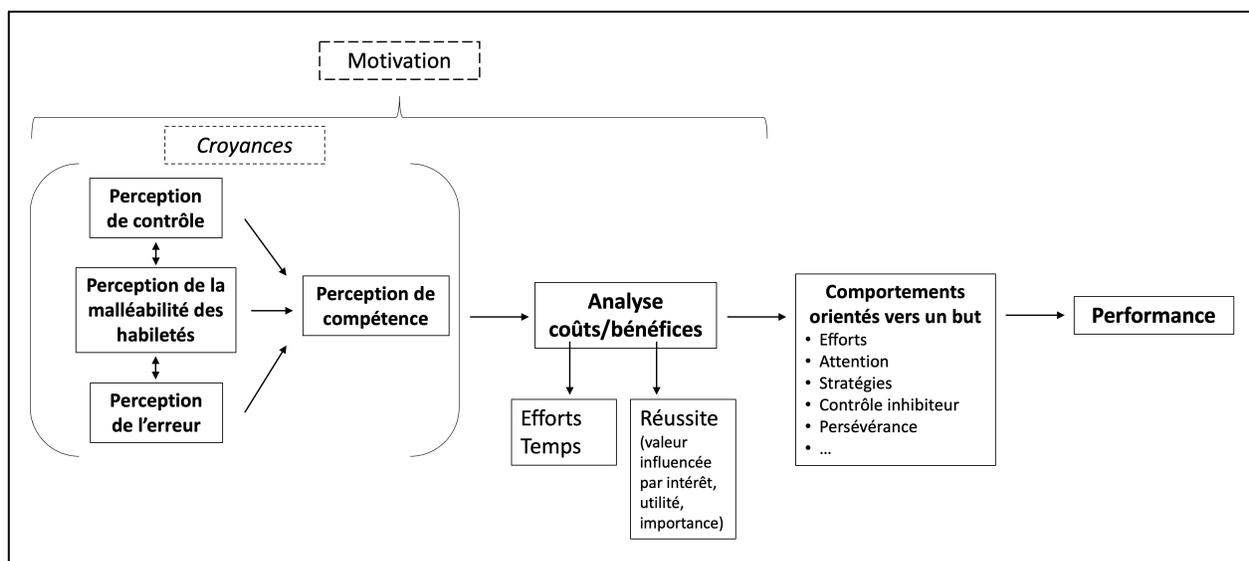


Figure 2.2 Modèle illustrant les relations présumées entre les différents construits motivationnels et leur influence sur le comportement de l'élève.

Ce modèle s'approche de l'une des théories les plus utilisées dans le domaine de la motivation scolaire, soit la théorie attentes-valeur (Eccles et Wigfield, 2002; Fréchette-Simard *et al.*, 2019; Weiner, 2000). En effet, cette théorie tient compte d'une part des attentes de l'élève (perception de compétence, perception de contrôle) et d'autre part de la valeur de la tâche à ses yeux (intérêt,

utilité, importance). Le modèle présenté ci-haut reprend ces concepts fondamentaux, en y intégrant des concepts issus de la théorie de l'état d'esprit (perception de la malléabilité des habiletés et de l'erreur) et en les distinguant les uns des autres. Les flèches partant de la perception de contrôle et de la perception de l'erreur vers la perception de la malléabilité des habiletés indiquent l'influence possible des deux premières variables sur la troisième. Par exemple, si un élève croit qu'il a du contrôle sur sa réussite par les efforts qu'il met et que ses erreurs lui permettent de mieux comprendre, il pourra croire qu'il est possible de s'améliorer (perception malléable des habiletés). Toutefois, cette influence n'est peut-être pas toujours présente : un élève qui ne pense détenir aucun pouvoir sur sa réussite peut tout de même croire qu'il peut s'améliorer, mais que cette amélioration est simplement due à un facteur qui ne relève pas de lui. À l'inverse, la croyance d'un élève en la possibilité de s'améliorer (perception de la malléabilité des habiletés) peut l'amener à croire qu'il a donc du contrôle sur sa réussite et que ses erreurs peuvent l'aider à s'améliorer. Puis, comme l'indiquent les trois flèches pointant vers la perception de compétence, cette dernière peut notamment être influencée par la perception de la malléabilité des habiletés, la perception de contrôle (Eccles et Wigfield, 2002) et la perception de l'erreur (Doucet *et al.*, 2020), mais possède un statut distinct des trois autres. Par exemple, une plus grande perception de contrôle pourrait mener l'élève à avoir une meilleure perception de compétence; puisqu'il pense pouvoir influencer sa réussite, cela pourrait favoriser la perception qu'il est capable de réussir. Par ailleurs, si l'élève croit qu'il ne réussira pas la tâche (faible perception de compétence) malgré les coûts investis (efforts, temps, etc.), il risque fort peu d'avoir envie de s'y investir, peu importe ses perceptions de la malléabilité de ses habiletés, de contrôle et de l'erreur. La perception de compétence face à la tâche semble donc représenter une condition déterminante quant à toute décision de s'y engager.

Ainsi, toutes ces croyances représentent des concepts motivationnels distincts, mais qui interagissent néanmoins entre eux (Doucet *et al.*, 2020). On joint finalement à ce modèle l'explicitation du phénomène de l'analyse coût-bénéfices qui, à notre avis, est la pierre angulaire qui déterminera à quel degré l'élève s'engagera dans la tâche, ce qui est susceptible d'influencer ultimement sa performance.

2.3 Hypothèses de recherche

Cette recherche tente de mieux comprendre les effets de l'enseignement du concept de neuroplasticité sur la motivation, la mobilisation du contrôle inhibiteur et la performance à une tâche contre-intuitive en mathématiques. Tel que présenté à la figure 2.2, un ensemble de croyances (perception de la malléabilité des habiletés, de contrôle, de l'erreur et de compétence) influencerait l'analyse coûts-bénéfices que fera l'élève pour déterminer son degré d'engagement dans la tâche, ce qui pourra se répercuter sur sa réussite. En influençant cet ensemble de croyances, il serait alors possible de modifier cette analyse coûts-bénéfices en faveur d'un plus grand engagement de la part de l'élève, notamment une plus grande mobilisation du contrôle inhibiteur. Des études ayant démontré des effets bénéfiques d'un enseignement du concept de neuroplasticité sur certains éléments impliqués dans ces croyances, la présente recherche tentera de déterminer les effets de cet enseignement sur chacun de ces construits motivationnels, sur la mobilisation du contrôle inhibiteur chez les élèves et sur leur performance à la tâche.

Plutôt que de simplement déterminer si l'intervention a des impacts positifs sur la performance, cette recherche a l'ambition de mieux comprendre pourquoi et comment cette intervention pourrait avoir de tels impacts, en étudiant aussi les mécanismes cérébraux impliqués dans ce phénomène à l'aide de la neuroimagerie. À notre connaissance, la seule recherche ayant observé ces mécanismes cérébraux à la suite d'une intervention l'a fait auprès de participants adultes à l'aide de l'électroencéphalographie (EEG) (Schroder *et al.*, 2014). Les autres études en EEG ont étudié les mécanismes cérébraux liés à un état d'esprit dynamique sans réaliser d'intervention pour modifier l'état d'esprit des participants (Mangels *et al.*, 2006; Moser *et al.*, 2011; Schroder *et al.*, 2017). Ces études corrélationnelles ne permettent donc pas d'établir de relation de cause à effet entre l'état d'esprit et les résultats obtenus, ce qui renforce la pertinence de mettre en place une telle intervention dans la présente recherche. Bien que la présente étude ne puisse prétendre établir une relation de cause à effet en raison de ses limites, la manipulation de la variable « intervention » et le contrôle aussi rigoureux que possible des autres variables permettent de s'en approcher. Finalement, une seule étude (Myers *et al.*, 2016) a utilisé l'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle (IRMf) en lien avec ce phénomène, mais cette recherche a étudié la connectivité entre certaines régions cérébrales alors que les participants étaient au repos. La présente recherche utilisera donc l'IRMf afin, d'une part, de cibler avec une meilleure précision spatiale que l'EEG

les mécanismes cérébraux mobilisés à la suite de l'intervention lors de la réalisation d'une tâche contre-intuitive comportant une rétroaction et, d'autre part, de trianguler les résultats avec ceux obtenus en EEG dans d'autres études en vérifiant si les régions cérébrales généralement associées au contrôle inhibiteur sont effectivement activées dans ce contexte. Comme mentionné précédemment, puisque le contrôle inhibiteur ne peut être mesuré que de façon indirecte, la triangulation à l'aide de différentes méthodologies constitue une pratique essentielle. D'ailleurs, les temps de réponse constituant aussi un indicateur de la mobilisation du contrôle inhibiteur, ils seront également mesurés afin de trianguler les résultats avec ceux en neuroimagerie. Finalement, comme la littérature suggère que la réaction des élèves face à l'erreur diffère selon leurs croyances, c'est-à-dire que les élèves ayant un état d'esprit plus dynamique porteraient davantage attention à la rétroaction alors que les élèves à l'état d'esprit plus fixe se désengageraient, la présente recherche tentera également de vérifier si l'enseignement du concept de neuroplasticité a un impact sur cette réaction. Ainsi, lorsqu'ils reçoivent une rétroaction négative, les participants du groupe expérimental devraient mobiliser davantage des régions cérébrales liées à l'attention, comme le cortex préfrontal dorsolatéral, alors que les participants du groupe contrôle mobiliseraient davantage des régions liées au désengagement ou au « mode par défaut » du cerveau, telles que le précunéus (Vestergren et Nyberg, 2014). Le « mode par défaut » est généralement associé au fait de ne pas porter son attention sur une tâche spécifique, mais plutôt de laisser errer ses pensées.

Ainsi, afin de répondre à la question de recherche, les différences entre un groupe expérimental, recevant l'enseignement du concept de neuroplasticité, et un groupe contrôle, recevant une intervention contrôle, seront étudiées. À la lumière des résultats obtenus par les recherches antérieures, les hypothèses de recherche se traduisent de la façon suivante :

1. Une augmentation de la motivation dans le groupe expérimental, mesurée par un questionnaire motivationnel, sera observée suite à l'enseignement du concept de neuroplasticité, contrairement au groupe contrôle;
2. Comparativement au groupe contrôle, l'enseignement du concept de neuroplasticité dans le groupe expérimental favorisera davantage la mobilisation du contrôle inhibiteur lors des essais contre-intuitifs, reflétée à la fois par une plus grande activation des régions cérébrales associées au contrôle inhibiteur (principalement le cortex préfrontal ventrolatéral) ainsi que

par des temps de réponse plus longs;

3. Cette mobilisation du contrôle inhibiteur sera associée à un taux de réussite plus élevé à la tâche dans le groupe expérimental, comparativement au groupe contrôle;
4. Lors des rétroactions négatives, une plus grande activation des régions cérébrales liées à l'attention (principalement le cortex préfrontal dorsolatéral) sera observée au sein du groupe expérimental, comparativement au groupe contrôle.

De façon opérationnelle, une augmentation du score motivationnel devrait être observée dans le groupe expérimental entre le prétest et le posttest, et non dans le groupe contrôle, pour confirmer l'hypothèse 1. En lien avec l'hypothèse 2, la comparaison du groupe expérimental par rapport au groupe contrôle devrait démontrer une activité cérébrale plus forte pour les essais contre-intuitifs dans le cortex cingulaire antérieur et dans le cortex préfrontal (dorsolatéral et ventrolatéral), mais plus particulièrement dans le cortex préfrontal ventrolatéral, reflétant ainsi une plus grande mobilisation du contrôle inhibiteur chez les individus du groupe expérimental. Une augmentation des temps de réponse est également attendue dans ce groupe lors des essais contre-intuitifs, fournissant un indice complémentaire de mobilisation du contrôle inhibiteur. La comparaison des taux de réussite pour chacun des groupes permettra quant à elle de vérifier l'hypothèse 3, soit un plus haut taux de réussite anticipé dans le groupe expérimental suite à une plus grande mobilisation du contrôle inhibiteur. Enfin, en ce qui concerne l'hypothèse 4, la comparaison du groupe expérimental par rapport au groupe contrôle pour les moments de rétroaction négative devrait démontrer une plus grande activation du cortex préfrontal dorsolatéral, alors qu'il est attendu que l'inverse (groupe contrôle > groupe expérimental) permette d'observer une plus grande activation du précunéus.

CHAPITRE III

MÉTHODOLOGIE

Le présent chapitre fait état de la méthodologie employée pour ce projet de recherche. Y seront d'abord exposés le devis de recherche, la sélection et le recrutement des participants, ainsi que les interventions mises en place, réalisées sous la forme de courtes vidéos d'animation. Les choix concernant la collecte de données seront ensuite présentés, incluant le détail des questionnaires de pré-sélection (dont le questionnaire motivationnel), l'utilisation de l'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle (IRMf) et la tâche contre-intuitive en mathématiques, soit la comparaison de fractions. Finalement, l'analyse des données collectées et les considérations éthiques seront exposées.

3.1 Devis de recherche

Le devis de cette recherche, présenté à la figure 3.1, constitue un devis posttest seulement avec groupe contrôle. Puisque des séances d'IRMf sont onéreuses, complexes sur le plan méthodologique, présente un risque accru d'attrition et qu'un prétest concernant la tâche de comparaison de fractions aurait permis un apprentissage chez les participants, le choix du devis posttest seulement avec groupe contrôle a semblé être le plus raisonnable. Seules les données concernant la motivation bénéficient d'un prétest, mesurées à l'aide du questionnaire de présélection. Lors du recrutement et de la sélection des participants, ceux-ci ont été répartis de façon systématique et quasi-aléatoire entre les groupes expérimental et contrôle, en alternant le groupe assigné selon l'ordre d'inscription et de sélection. En raison de nombreuses contraintes étaient associées à l'utilisation de l'IRMf (notamment en termes de disponibilité), nous avons dû collecter les données au fur et à mesure que les participants étaient sélectionnés. Il n'était donc pas possible d'attendre la fin du recrutement pour répartir les participants dans les groupes à l'aide d'un tirage au sort. Chaque groupe a ensuite vécu son intervention respective, puis les participants ont réalisé la tâche de comparaison de fractions à l'intérieur de l'appareil d'IRMf la même journée. La présence d'un groupe contrôle et le fait que les participants soient répartis de façon aléatoire dans chacun des groupes font en sorte que la plupart des obstacles à la validité interne sont contrôlés

(Fortin, 2010). La validité externe est quant à elle accrue par le contrôle de l'interaction entre la mesure et l'intervention, notamment par la standardisation des procédures (Fortin, 2010).

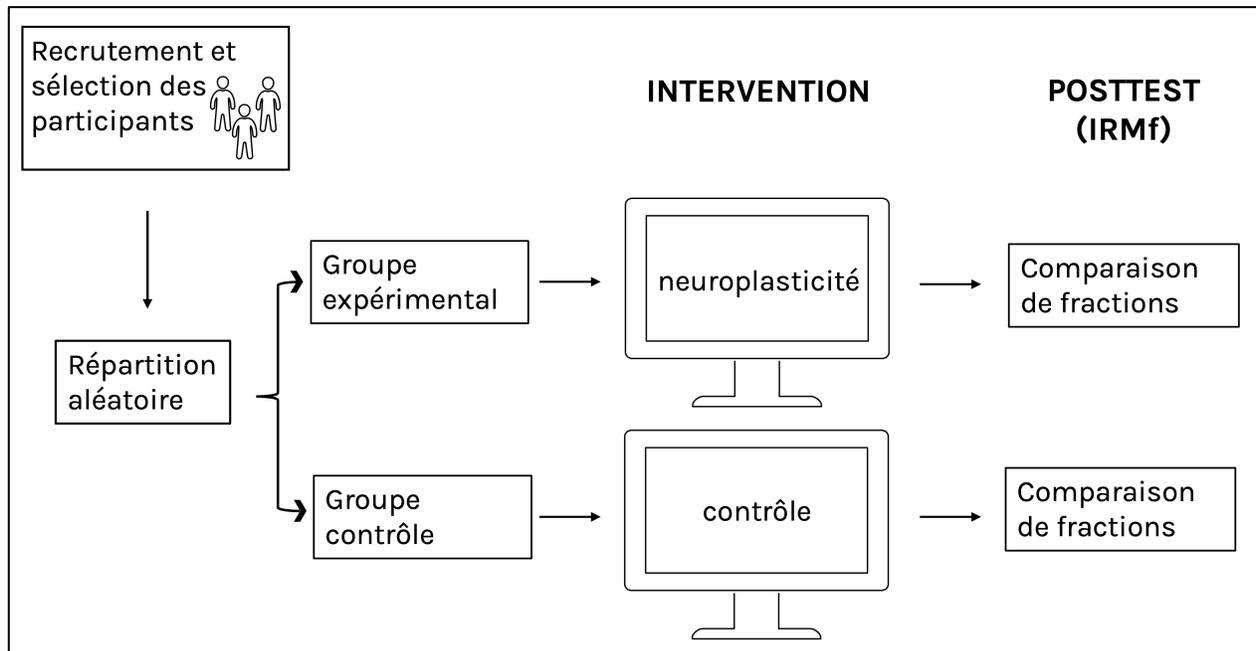


Figure 3.1 Devis de recherche.

3.2 Participants

La section suivante présente la façon dont la sélection des participants et la constitution de l'échantillon ont été réalisées, puis détaille les stratégies de recrutement utilisées.

3.2.1 Sélection et échantillon

Afin de répondre à la question de recherche et de vérifier les hypothèses, cette étude comparative de type expérimental a été menée auprès d'élèves de 10 à 12 ans (3^e cycle du primaire). Ce groupe d'âge a été choisi parce qu'il s'agit de l'âge identifié dans la littérature à partir duquel il est possible d'observer une différence dans la réaction de l'élève face à l'erreur, selon son type d'état d'esprit (Dweck, 2002). Selon Dweck (2002), bien que les élèves plus jeunes puissent détenir un état d'esprit fixe, ce serait en effet autour de cet âge (10-12 ans) qu'une perception plus fixe de leurs habiletés commencerait à influencer négativement leur réaction devant un échec, pouvant ainsi miner leur motivation et se répercuter sur leurs résultats scolaires. Il apparaît donc souhaitable

d'intervenir tôt auprès des élèves, mais étudier ce phénomène chez des élèves plus jeunes peut s'avérer plus ardu, soit parce qu'ils n'ont pas nécessairement une compréhension claire de ces concepts (Heyman *et al.*, 1992), ou encore parce que l'évaluation de construits motivationnels auprès de jeunes élèves implique un investissement plus important sur le plan méthodologique. Par exemple, des chercheurs ont évalué l'état d'esprit de jeunes enfants à l'aide d'entrevues au cours desquelles on leur présentait un scénario et on leur demandait à quel point ils étaient en accord avec le personnage (Heyman et Dweck, 1998; Schroder *et al.*, 2017). Par ailleurs, le choix de la tâche de comparaison de fractions a également contribué au choix du groupe d'âge, puisqu'au Québec et dans de nombreux pays, c'est à ce niveau scolaire (5^e-6^e année au Québec) que la comparaison de fractions est travaillée.

Puisqu'il s'agit d'une étude en neuroimagerie, il était également nécessaire de réduire au mieux la variabilité cérébrale associée à des facteurs autres que celui à l'étude afin de s'assurer d'une puissance statistique suffisante. La préférence manuelle des participants est l'un des facteurs pouvant influencer cette variabilité cérébrale, les gauchers présentant une plus grande variabilité de la latéralisation de certaines fonctions (Good *et al.*, 2001). Comme cette variabilité cérébrale n'est pas en lien avec les objectifs de la recherche et que relativement peu de participants étaient prévus pour cette étude, les particularités cérébrales des gauchers auraient ajouté une variabilité non désirée qui aurait pu diminuer la puissance statistique des analyses. La préférence manuelle des participants a donc été prise en compte et seuls les individus droitiers ont été retenus. Le milieu socioéconomique d'un individu est également un facteur pouvant avoir un impact sur la variabilité cérébrale (D'Angiulli *et al.*, 2012); la répartition aléatoire des participants devrait faire en sorte que les différences d'activité cérébrale entre les groupes ne soient pas attribuables à cette variabilité. Bien qu'il soit possible que les parents ayant accepté que leur enfant participe à la recherche possèdent un niveau socioéconomique moyen différent de ceux ne s'étant pas portés volontaires, ce biais est atténué par le fait que les analyses statistiques reposent sur des comparaisons.

Ainsi, les critères de sélection initiaux des participants étaient les suivants : (1) avoir entre 10 et 12 ans; (2) être droitier; (3) commettre le type d'erreurs recherché selon le questionnaire mathématique administré (voir section *Questionnaires*) et (4) obtenir un score sous la moyenne pour chacun des quatre construits motivationnels évalués par le questionnaire motivationnel (voir section *Questionnaires*). En imagerie par résonance magnétique fonctionnelle (IRMf), des

statisticiens spécialistes de l'IRMF recommandent une taille d'échantillon d'une vingtaine de participants par groupe, car cette taille semble associée à une puissance statistique suffisante (Button *et al.*, 2013; Desmond et Glover, 2002; Murphy et Garavan, 2004). Toutefois, afin d'obtenir 20 participants au final, il est nécessaire d'en recruter davantage, soit idéalement 30 par groupe, en raison des abandons et des données possiblement inutilisables si trop de mouvement a lieu. L'échantillon visait donc à composer un groupe expérimental et un groupe contrôle comportant 30 participants chacun, répartis de façon quasi-aléatoire dans l'un ou l'autre des groupes, permettant de les considérer comme n'étant pas différents. Nous avons été en mesure de recruter au départ 58 participants, puis l'échantillon final était composé de 44 participants. Des analyses *a posteriori* ont ensuite confirmé l'équivalence initiale des groupes sur l'ensemble des données recueillies.

3.2.2 Recrutement

Afin d'arriver à rejoindre le plus grand nombre d'élèves possible, une vidéo de recrutement a été réalisée. Cette vidéo invitait les enseignants de 5^e et 6^e année du primaire de la grande région de Montréal et les parents d'enfants de 10 à 12 ans à participer au projet de recherche en expliquant les principales étapes et se terminant par un lien vers le formulaire d'inscription. La vidéo a été partagée sur les réseaux sociaux dans les groupes d'enseignants et via des publicités Facebook. Les enseignants intéressés à ce que leurs élèves participent au projet inscrivaient dans le formulaire en ligne leur nom, le nom de leur école (et de leur centre de services scolaire si applicable) et leur niveau d'enseignement. Afin de minimiser la présence d'un biais concernant l'intervention sur la neuroplasticité, il leur était demandé s'ils discutaient du cerveau avec leurs élèves ainsi que s'ils connaissaient la théorie de l'état d'esprit (*mindset*) et s'ils la mettaient en application. Ceux répondant par l'affirmative à l'une ou l'autre de ces questions n'étaient donc pas retenus. Ce formulaire les informait également que leur collaboration impliquait de faire parvenir aux parents de leurs élèves un dépliant d'information sur le projet ainsi qu'un formulaire comportant un coupon-réponse signifiant leur désir ou non de participer. En échange de la collaboration des enseignants, nous leur avons envoyé personnellement, après la collecte de données, la vidéo concernant l'enseignement du concept de neuroplasticité. Les parents qui retournaient le coupon-réponse manifestant leur intérêt recevaient ensuite un courriel d'informations sur le projet et le lien vers le formulaire d'inscription. Ce formulaire en ligne récoltait les données suivantes : nom de

l'enfant, sexe, âge, année scolaire, préférence manuelle et particularités (p. ex., diagnostic ou plan d'intervention). Les parents qui prenaient connaissance du projet via les réseaux sociaux pouvaient s'inscrire à partir du même formulaire.

Une fois les formulaires de réponses recueillis, une prise de contact avec les parents était faite par téléphone afin de leur expliquer plus en détail la nature de la recherche et les modalités de passation. Afin d'éviter de biaiser les résultats de la recherche, il était seulement mentionné aux parents et aux participants qu'il s'agissait d'une étude visant à mieux comprendre les mécanismes cérébraux liés aux mathématiques. Afin de s'assurer que les participants ne présentaient aucune contre-indication à la passation d'une imagerie par résonance magnétique (p. ex., présence d'un stimulateur cardiaque), les questions du formulaire de dépistage pour étude en IRM (voir Annexe B) étaient posées au parent lors de l'appel téléphonique, puis le rendez-vous pour la séance était pris avec le parent.

3.3 Interventions

La journée de leur rendez-vous pour la séance d'imagerie, les participants se sont rendus à l'Unité de neuroimagerie fonctionnelle (UNF) du Centre de recherche de l'Institut universitaire de gériatrie de Montréal (CRIUGM). Les interventions relatives à chaque groupe se déroulaient sur place juste avant la séance d'imagerie, dans la salle de test.

De façon à bien isoler les effets de l'enseignement du concept de neuroplasticité, le groupe contrôle a reçu un enseignement semblable à celui du groupe expérimental sur le plan de la forme, mais en abordant un contenu différent. Comme la réalisation de vidéos d'animation implique des coûts parfois importants, une vidéo déjà existante a d'abord été choisie comme intervention contrôle. Cette vidéo porte sur les changements climatiques (<https://www.dailymotion.com/video/x2ve3ae>) et a été produite par l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie (ADEME). Elle a été choisie comme intervention contrôle parce que la durée, le type d'animation et le niveau de vulgarisation correspondaient aux caractéristiques désirées pour la réalisation de la vidéo sur la neuroplasticité. Quant au contenu de la vidéo, il était surtout nécessaire de s'assurer qu'il n'était pas en lien avec l'idée selon laquelle il est possible de s'améliorer.

Le groupe expérimental a visionné une vidéo de 4 minutes 33 secondes sur le concept de neuroplasticité de façon vulgarisée afin de s'adapter à l'âge des élèves (lien vers la vidéo : <http://www.labneuroeducation.org/cerveau>). Le contenu de cette vidéo a été réfléchi pour correspondre aux construits motivationnels présentés à la figure 2.2 que l'on soupçonne avoir un impact sur l'engagement de l'élève et ultimement sa performance, et qui ont été évalués par le questionnaire motivationnel (présenté à la section suivante). Ces quatre construits sont la *Perception de la malléabilité des habiletés*, la *Perception de contrôle*, la *Perception de l'erreur* et la *Perception de compétence*.

La vidéo aborde en premier lieu l'idée de la malléabilité des habiletés en présentant d'abord les concepts de base liés au fonctionnement du cerveau, notamment ce qu'est un neurone et l'idée selon laquelle les connexions neuronales se modifient et se renforcent pour devenir plus efficaces. Puis, il y est explicité que pour apprendre, il faut donc modifier et renforcer nos connexions neuronales, et que le renforcement des connexions mène à une amélioration des habiletés et compétences. L'idée de contrôle est ensuite abordée en détaillant comment il est possible d'influencer la neuroplasticité. Il est notamment expliqué que l'effort et l'utilisation de diverses stratégies, comme la pratique, mènent au renforcement des connexions neuronales. Une autre stratégie permettant d'influencer la neuroplasticité détaille la façon dont, dans certains contextes contre-intuitifs (ou comportant un « piège »), il est nécessaire d'inhiber certains neurones liés à des automatismes pour que les neurones appropriés au contexte puissent s'activer. Le segment suivant aborde ensuite la notion d'erreur en la décrivant comme nécessaire à l'apprentissage. Les différentes réactions d'un élève face à une erreur ou une difficulté sont présentées, c'est-à-dire l'interpréter soit comme un défi à relever, ce qui mènera à l'utilisation des stratégies présentées préalablement, soit comme un signe d'incapacité, ce qui est décourageant pour l'élève et qui le mènera probablement à fournir moins d'effort, et peut-être même jusqu'à abandonner. Il est également mentionné que c'est en portant attention à la rétroaction que l'on peut éviter de refaire les mêmes erreurs. Un accent est aussi mis sur l'idée selon laquelle si une tâche est difficile, cela signifie qu'on apprend et il faut donc persévérer pour renforcer nos connexions neuronales en lien avec cet apprentissage. Finalement, la vidéo se conclut sur la perception de compétence en explicitant que si l'élève pense qu'il est en mesure de réaliser la tâche, son cerveau s'activera davantage que s'il croit qu'il n'est pas capable de la réussir. Une courte conclusion rappelle les

éléments clés présentés. Tout au long de la vidéo, plusieurs exemples concrets sont aussi présentés aux élèves pour illustrer les propos (p. ex., un enfant qui apprend à faire du vélo). Cette vidéo a été construite aux fins de la présente recherche, mais son contenu est grandement inspiré de recherches antérieures et de matériel pédagogique varié (p. ex., Lanoë *et al.*, 2015).

Après le visionnement de la vidéo, il était demandé aux participants des deux groupes, de façon individuelle, de résumer ce qu'ils en avaient compris. En effet, en plus de permettre de s'assurer que les participants du groupe expérimental aient bien saisi le message important de l'intervention, des recherches montrent que l'élaboration d'explications est susceptible de renforcer ce qui vient d'être appris (Bisra *et al.*, 2018; Pressley *et al.*, 1987). La vidéo était ensuite visionnée à nouveau (le participant en avait été averti avant le premier visionnement), afin d'offrir une occasion de répétition et ainsi également renforcer les réseaux neuronaux liés à ces nouveaux apprentissages (Riopel et McMullin, 2021). Trois questions de compréhension de type « vrai ou faux » étaient finalement posées au participant afin de s'assurer qu'il avait bien compris les messages principaux. Par ailleurs, bien que la durée de la vidéo soit courte, le choix de cette intervention a été basé sur le fait que des recherches antérieures ont obtenu des résultats significatifs en utilisant des interventions de très courte durée : par exemple, l'intervention utilisée par Schroder *et al.* (2014) ne consistait qu'en la lecture d'un court texte (quelques minutes).

3.4 Collecte de données

3.4.1 Questionnaires

Comme mentionné plus haut, afin de sélectionner des participants respectant les critères de sélection et d'évaluer leur profil motivationnel avant l'intervention, deux questionnaires en ligne de présélection devaient être remplis par les élèves : le premier servant à cerner le profil d'erreurs commises en situations contre-intuitives en mathématiques, le second à évaluer le profil motivationnel des élèves, soit les croyances en lien avec les quatre construits motivationnels distingués dans le modèle présenté au chapitre II. Le questionnaire en mathématiques, présenté à l'Annexe D, contenait différentes questions régulièrement présentées aux élèves de 3^e cycle du primaire, dont une question de comparaison de fractions comportant 10 items. Cinq de ces paires de fractions consistaient en des items intuitifs (p. ex., comparer un tiers et deux tiers), qui ne

présentent pas d'interférence et ne nécessitent donc pas le contrôle inhibiteur, alors que les cinq autres consistaient en des items contre-intuitifs (p. ex., comparer un quart et un tiers), qui comportent une interférence et nécessitent le contrôle inhibiteur. Les autres questions portaient sur d'autres concepts contre-intuitifs (nombres décimaux, périmètre/aire et probabilités), qui présentaient également une interférence et donc pour lesquels le contrôle inhibiteur était aussi nécessaire. Il était demandé aux élèves de répondre en cinq secondes, mais aucune limite de temps n'était concrètement imposée. Les temps de réponse étaient toutefois mesurés afin d'avoir une idée de l'aisance des élèves à répondre. Ce questionnaire visait à sélectionner les élèves ayant le profil recherché : réussir les items intuitifs et tomber dans le piège des items contre-intuitifs. Dans l'étude de Gómez *et al.* (2019), 50 % des participants de 10 à 12 ans présentaient ce profil. Comme l'intervention du groupe expérimental visait à favoriser la mobilisation du contrôle inhibiteur après une erreur dans le but de surmonter l'interférence des prochains items contre-intuitifs, les participants ne devaient pas réussir ce type d'items avant l'intervention. Afin de s'assurer que leurs erreurs n'étaient pas associées au concept de fraction de façon plus générale, ils devaient tout de même être en mesure de réussir certains items de comparaison de fractions; c'est la raison pour laquelle ils devaient réussir la majorité des items intuitifs. Toutefois, il a été ardu de recruter des participants qui commettaient suffisamment d'erreurs dans les items contre-intuitifs de comparaison de fractions, notamment en raison du peu d'items de ce type (cinq seulement). Comme l'idée générale était de recruter des élèves qui commettent fréquemment des erreurs dans des tâches contre-intuitives, le critère a été élargi à l'ensemble du questionnaire mathématique. Ainsi, en plus de devoir réussir au moins trois items intuitifs de comparaison de fractions (sur les cinq) afin de s'assurer de la compréhension de ce concept, les participants devaient avoir subi une interférence pour l'ensemble du questionnaire, c'est-à-dire ne pas avoir réussi plus d'items contre-intuitifs que d'items intuitifs au total. Six participants ont été exclus pour ne pas avoir réussi un minimum de trois items intuitifs de comparaison de fractions, et quatre autres participants ont été exclus pour avoir réussi davantage d'items contre-intuitifs que d'intuitifs sur l'ensemble du questionnaire.

Le questionnaire visant à évaluer le profil motivationnel des élèves (voir Annexe E) a été développé en cohérence avec le modèle présenté à la figure 2.2 du chapitre précédent, mais a été grandement inspiré de questionnaires antérieurs portant sur l'état d'esprit, la perception de compétence ou sur la motivation de façon plus générale (p. ex., Chen et Pajares, 2010; Erdley et Dweck, 1993;

Issaieva, 2013; Stipek et Gralinsky, 1996; Trautwein *et al.*, 2012; Vezeau *et al.*, 2004; Wigfield et Eccles, 2000). Il a été construit dans le but de pallier les limites soulevées par la littérature dans les études précédentes et de tenter de mesurer de façon plus précise chaque construit motivationnel présent dans le modèle. Ainsi, compte tenu des limites des questionnaires antérieurs soulevées au chapitre II, il a été choisi de formuler tous les items de façon à référer à la perception de l'élève par rapport à lui-même plutôt qu'à la perception des individus en général, puisque c'est cette perception qui est davantage susceptible d'influencer son analyse coûts-bénéfices, qui le concerne directement. Comme les élèves peuvent également entretenir des perceptions différentes selon la matière (Chen et Pajares, 2010), par exemple croire qu'ils peuvent s'améliorer en français et non en mathématiques, les énoncés ont tous été formulés de façon à référer aux mathématiques. Finalement, pour les raisons évoquées au chapitre précédent concernant les différentes conceptions possibles du terme « intelligence », ce terme n'a pas été utilisé dans ce questionnaire.

Sur le plan plus technique, un certain nombre d'énoncés visait à évaluer de façon distincte chacun des quatre construits motivationnels, soit la *Perception de la malléabilité des habiletés*, la *Perception de contrôle*, la *Perception de l'erreur* et la *Perception de compétence*. Un nombre équivalent d'énoncés représentant les perceptions aux extrémités du continuum a d'abord été créé pour chacune des perceptions. Par exemple, pour la *Perception de la malléabilité des habiletés*, on retrouvait trois énoncés représentant une perception très malléable des habiletés et trois énoncés représentant une perception fixe des habiletés. Les énoncés suivants représentent des exemples d'items pour chaque catégorie :

Perception de la malléabilité des habiletés

1. Je ne peux pas vraiment m'améliorer en mathématiques.
2. Peu importe si je suis bon(ne) ou non en mathématiques, je peux toujours devenir meilleur(e).

Perception de contrôle

1. Avec de la pratique, je peux m'améliorer en mathématiques.

2. Si j'utilise de bonnes stratégies, je serai capable d'avoir de bons résultats en mathématiques.

Perception de l'erreur

1. Mes erreurs en mathématiques sont utiles car elles me permettent de comprendre et de m'améliorer.
2. Quand j'ai de la difficulté dans un exercice en mathématiques, je peux quand même arriver à le réussir.

Perception de compétence

1. J'ai de la difficulté à comprendre tout ce qui concerne les mathématiques.
2. Je pense obtenir d'excellents résultats en mathématiques cette année.

Les participants devaient se prononcer sur leur niveau d'accord avec chacun des énoncés à l'aide d'une échelle de Likert à six niveaux (allant de *Pas du tout d'accord* à *Tout à fait d'accord*), d'une part pour éviter de leur offrir une option neutre avec laquelle ils n'auraient pas à se prononcer et d'autre part pour permettre un certain degré de nuance dans l'interprétation des réponses. Au total, 28 énoncés ont d'abord été élaborés, mais cette version du questionnaire a fait l'objet d'une pré-expérimentation afin de vérifier sa validité et sa fidélité et de sélectionner un plus petit nombre d'énoncés (pour minimiser le temps de passation). 95 élèves de 10 à 12 ans ont répondu en ligne à cette première version du questionnaire. Les énoncés étaient présentés de façon aléatoire à l'intérieur de chacune des quatre sections, qui étaient elles aussi présentées aléatoirement.

Afin de s'assurer que les quatre construits mesurent effectivement des concepts différents, la validité de construit a d'abord été vérifiée par le biais d'une analyse en composantes principales réalisée avec SPSS28. Après plusieurs itérations de l'analyse (rotation Varimax et normalisation Kaiser) en raison de l'exclusion d'items n'atteignant pas un poids factoriel d'au moins 0,4 dans une seule composante (Stevens, 2009), la matrice des composantes suivante a été retenue :

Tableau 3.1 Rotation de la matrice des composantes

Items	Composantes				Alpha de Cronbach (α)
	1 (compétence)	2 (habiletés)	3 (contrôle)	4 (erreur)	
Compétence4	0,828	-0,015	0,182	-0,022	0,911
Compétence8	0,826	0,086	0,257	0,171	
Compétence1	0,820	0,249	0,175	0,007	
INVCompétence2	0,802	0,140	0,025	0,038	
Compétence6	0,752	0,119	0,308	0,053	
INVCompétence7	0,742	0,240	0,199	0,324	
INVCompétence5	0,727	0,170	0,038	0,044	
INVHabileté3	0,155	0,875	0,193	-0,026	0,795
Habileté4	0,086	0,812	0,296	0,173	
INVHabileté1	0,190	0,736	0,032	0,051	
Habileté2	0,279	0,503	0,385	0,389	
Contrôle6	0,160	0,069	0,804	0,096	0,764
Contrôle2	0,215	0,236	0,752	0,090	
Contrôle3	0,237	0,270	0,727	0,148	
Erreur1	0,098	0,016	0,043	0,943	0,798
Erreur7	-0,003	0,104	0,165	0,902	
Erreur6	0,401	0,382	0,292	0,482	

Chaque énoncé retenu contribue effectivement à un facteur avec un poids au-dessus du seuil ($> 0,4$), sans atteindre ce poids pour les autres facteurs. La seule exception concerne le dernier énoncé, qui atteint un poids de 0,401 sur un deuxième facteur. Comme ce poids se situe à la limite établie et qu'un facteur doit comprendre au minimum trois énoncés (Lloret-Segura *et al.*, 2014), le choix de conserver cet item a été fait. L'indice KMO pour cette matrice est de 0,855 et le test de sphéricité de Barlett est significatif ($p < 0,001$). Les résultats de l'analyse en composantes principales pour ces quatre facteurs indiquent qu'ils permettent d'expliquer 71,56 % de la variance. La cohérence interne pour l'ensemble de ces 17 items est excellente ($\alpha = 0,900$) et les alphas de Cronbach pour

chacune des composantes sont présentés dans le tableau 3.1, se situant tous au-dessus du seuil de 0,7.

Cette dernière version du questionnaire, présentant une bonne fiabilité et validité, a donc été utilisée dans le but de sélectionner les élèves participant à l'étude. Le score motivationnel total a été calculé en octroyant une pondération égale pour chaque variable motivationnelle, pour un score total maximal de 24. Au départ, il était prévu que seuls les élèves ayant obtenu un score sous la moyenne pour chacun des quatre construits seraient sélectionnés. Cependant, il a encore une fois été difficile de recruter des participants correspondant parfaitement à ce critère, d'autant plus que les résultats au questionnaire présentent un effet plafond. Comme dix participants avaient déjà été exclus en raison des critères liés au questionnaire en mathématiques, aucun participant n'a finalement été exclu sur la base du questionnaire motivationnel. Tous les participants ont à nouveau répondu à ce questionnaire en posttest, juste après l'écoute de la vidéo d'intervention (avant leur séance d'IRMf, dans la salle de test du centre de recherche) afin de vérifier si l'enseignement du concept de neuroplasticité avait influencé les variables motivationnelles chez les participants du groupe expérimental, comparativement au groupe contrôle.

3.4.2 Imagerie par résonance magnétique fonctionnelle

Tel que mentionné au chapitre précédent, plusieurs techniques peuvent être employées afin d'inférer la présence de contrôle inhibiteur dans une tâche. Toutefois, comme il s'agit toujours de mesures indirectes et que chacune comporte ses limites, il est important d'avoir recours à plus d'une technique afin de trianguler les résultats et ainsi renforcer leur validité. Par exemple, bien que l'utilisation des temps de réponse fournisse un indice de l'utilisation de processus plus complexes, des temps de réponse plus longs ne reflètent pas nécessairement une mobilisation du contrôle inhibiteur. Une technique plus précise, l'amorçage négatif, est parfois utilisée pour mesurer le contrôle inhibiteur, mais, comme d'autres techniques, l'interprétation des résultats d'une recherche utilisant cette technique reste toujours très dépendante de la qualité de la tâche utilisée, notamment de la façon dont le contrôle inhibiteur a été isolé. L'utilisation de la neuroimagerie permet donc de pallier certaines limites liées à l'utilisation exclusive de ces techniques, en plus de permettre une compréhension plus fondamentale par la mesure de l'activité cérébrale liée au contrôle inhibiteur.

L'électroencéphalographie (EEG) est un exemple de technique de neuroimagerie parfois utilisée pour détecter la présence de contrôle inhibiteur. L'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle (IRMf) a toutefois été choisie dans la présente recherche afin, d'une part, de cibler avec une meilleure précision spatiale que l'EEG les mécanismes cérébraux mobilisés à la suite de l'intervention. En effet, l'EEG possède une faible précision spatiale, alors que l'IRMf peut localiser des activations cérébrales avec une précision de l'ordre de quelques millimètres, ce qui permet d'identifier de façon précise l'activation des régions liées au contrôle inhibiteur (notamment le cortex préfrontal ventrolatéral). D'autre part, comme la plupart des études sur l'état d'esprit ont utilisé l'EEG pour mesurer le contrôle inhibiteur, l'utilisation de l'IRMf permettait en plus de trianguler les résultats avec ceux obtenus en EEG dans les études précédentes et donc de vérifier si la mobilisation du contrôle inhibiteur s'observe également à l'aide d'une autre technique d'imagerie, dont la validité empirique en lien avec le contrôle inhibiteur est bien établie (c'est-à-dire que le rôle du cortex préfrontal ventrolatéral dans la mobilisation du contrôle inhibiteur est bien documenté). Par ailleurs, l'IRMf est une technique tout à fait sécuritaire et non invasive, à condition de respecter les contre-indications énoncées dans le formulaire de dépistage (voir Annexe B). En effet, aucune radiation n'est émise par l'appareil puisqu'il s'agit d'un champ magnétique. Néanmoins, l'utilisation de l'IRMf comporte certains inconvénients, notamment l'accessibilité à un appareil d'IRM. La direction de recherche du présent projet possède toutefois un accès à l'appareil de l'Unité de neuroimagerie fonctionnelle (UNF) du CRIUGM. Bien que l'utilisation de ce type d'appareil implique des coûts importants, la direction de recherche a reçu une subvention permettant d'assumer ces coûts, ce qui rendait ce projet possible. Dans ce contexte, le choix de l'IRMf présentait donc un rapport coûts-bénéfices intéressant. L'appareil utilisé est un Prisma Fit 3 Teslas de Siemens et les paramètres d'acquisition des images anatomiques et fonctionnelles sont présentés à l'Annexe C. Par ailleurs, il peut s'avérer complexe d'utiliser l'IRMf avec des enfants, notamment parce qu'il leur est demandé de bouger le moins possible, mais aussi parce que certains peuvent éprouver une certaine anxiété à entrer dans l'appareil. Différentes stratégies permettant de mettre l'enfant à l'aise, de le sécuriser et d'éviter qu'il fasse trop de mouvements sont toutefois bien documentées (Blanchette Sarrasin *et al.*, 2020; Leroux *et al.*, 2013). Par exemple, il est possible de réaliser un essai de pratique avec l'enfant dans un simulateur, c'est-à-dire un appareil qui ressemble au véritable appareil d'IRMf, mais sans prendre d'images du cerveau. Les bruits qu'émet l'appareil d'IRMf peuvent également être écoutés par l'enfant avant

la séance d'imagerie pour éviter de le surprendre. Ainsi, la mise en place de certaines de ces stratégies a permis de préparer les participants et de leur donner un aperçu plus concret de ce à quoi ressemblerait la séance d'imagerie.

3.4.3 Tâche de comparaison de fractions

Une tâche de comparaison de fractions a été sélectionnée pour mesurer la performance à la tâche en mathématiques ainsi que d'inférer la mobilisation du contrôle inhibiteur des participants. Cette tâche consiste à déterminer laquelle de deux fractions représente la quantité la plus élevée. Elle constitue l'un des exemples comportant des situations contre-intuitives nécessitant la mobilisation du contrôle inhibiteur parmi les mieux documentés (Gómez *et al.*, 2015; Obersteiner *et al.*, 2013; Rossi *et al.*, 2019; Van Hoof *et al.*, 2020) : les élèves ont généralement tendance à dire qu'un tiers est plus petit qu'un quart, puisque le dénominateur, trois, est plus petit que quatre. Ainsi, afin de surmonter l'interférence causée par les items contre-intuitifs et les réussir, il semble nécessaire de mobiliser le contrôle inhibiteur. Cette tâche est également tout à fait pertinente et adaptée à des élèves du 3^e cycle du primaire, étant donné que la comparaison de fractions est travaillée à ce niveau et que les nombres rationnels constituent une partie importante du curriculum. Bien que cette tâche aborde la comparaison de fractions de façon décontextualisée, il s'agit d'une tâche fréquemment rencontrée en situation scolaire au 3^e cycle.

En raison du contexte particulier de l'utilisation de l'IRMf, la tâche utilisée devait respecter certaines contraintes. D'abord, puisque les participants doivent rester le plus immobiles possible dans un appareil d'IRM, il est généralement recommandé de concevoir la tâche de façon à ce qu'ils puissent répondre en appuyant simplement sur un interrupteur à l'aide d'une boîte de réponse à l'intérieur de l'appareil. Ainsi, pour ce projet, les participants devaient déterminer laquelle de deux fractions présentées représentait la quantité la plus élevée en appuyant sur le bouton situé du côté de la fraction la plus grande (bouton de droite pour la fraction de droite et vice-versa). La tâche était d'abord pratiquée avant la séance d'imagerie dans la salle de test (cinq items de pratique) afin de s'assurer que le participant comprenne bien la tâche. Dans les consignes, un exemple de paires de fractions était fourni, rappelant aux participants qu'ils devaient comparer les valeurs de chacune des fractions de la paire. Il leur était mentionné qu'ils avaient cinq secondes pour répondre, et qu'ils devaient répondre le plus rapidement possible, mais en faisant le moins d'erreurs possible. Comme

la théorie de l'état d'esprit suggère qu'un état d'esprit dynamique permet aux élèves de percevoir les difficultés comme des défis, il leur était aussi mentionné que certains essais étaient plus difficiles que d'autres, dans le but d'exacerber les différences entre les deux groupes. En effet, les élèves du groupe expérimental pourraient être « énergisés » par ce défi, alors que les élèves du groupe contrôle pourraient déjà se décourager. Afin de vérifier la réaction des participants face à une erreur, une rétroaction corrective leur était donnée entre chaque essai, en indiquant si la réponse était correcte ou incorrecte à l'aide d'un crochet encadré en vert ou d'un « x » rouge, ainsi qu'en illustrant les fractions à l'aide de cercles divisés en parts égales selon le dénominateur de la fraction qu'ils représentaient, le numérateur correspondant au nombre de parts ombragées. Cette rétroaction leur était annoncée dans les consignes, tel qu'illustré dans la figure 3.2.

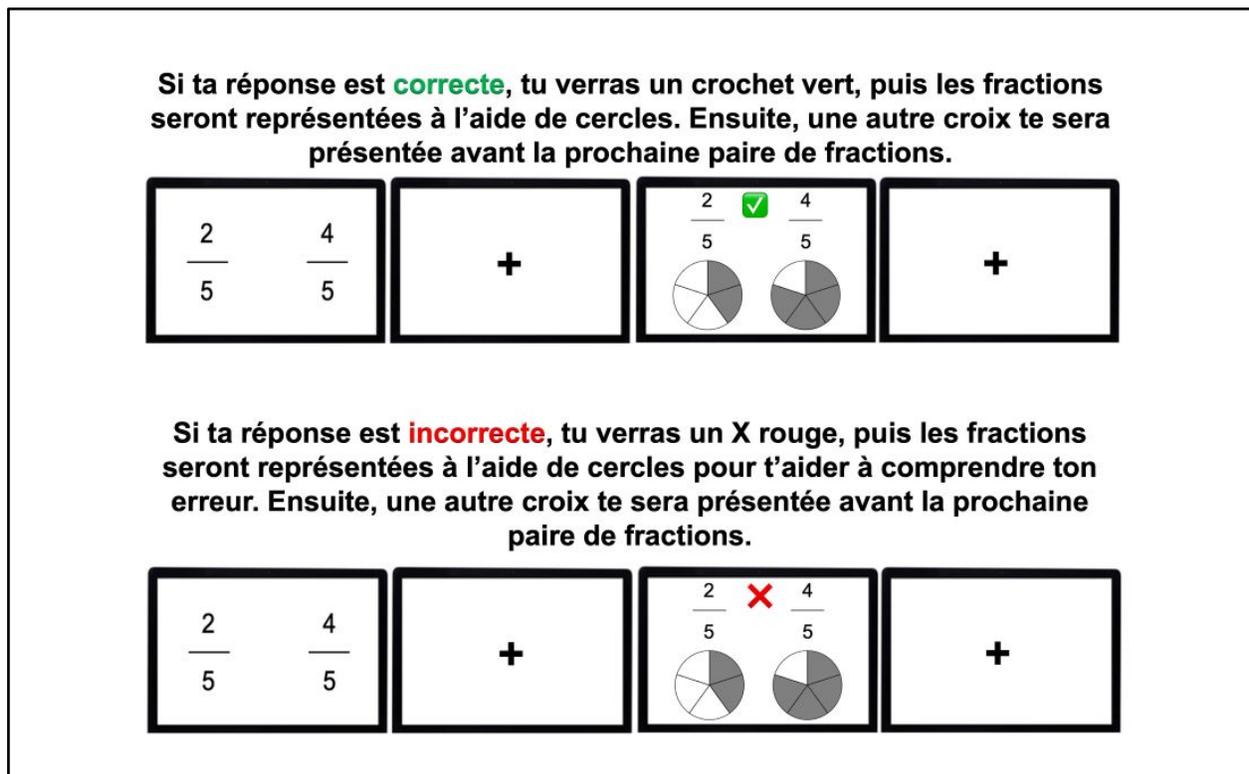


Figure 3.2 Extrait des consignes de la tâche concernant la rétroaction.

Cette tâche de comparaison de fractions apparaissait tout indiquée pour inférer le contrôle inhibiteur et la performance dans le contexte d'une tâche en mathématiques, d'abord car il s'agit d'une tâche dans laquelle les élèves font fréquemment des erreurs, mais qui est réalisable à condition de mobiliser le contrôle inhibiteur. Tel que mentionné précédemment, afin de pouvoir

inférer la mobilisation du contrôle inhibiteur à partir d'une tâche, celle-ci doit être construite de façon à isoler ce processus, notamment par l'équivalence des conditions en tous points, excepté sur la nécessité présumée du processus dans une condition. La tâche de comparaison de fractions a donc été conçue de façon à isoler au mieux la nécessité de mobiliser le contrôle inhibiteur dans les items contre-intuitifs. Ainsi, si une différence d'activité cérébrale était observée dans les régions liées au contrôle inhibiteur lors des essais contre-intuitifs comparativement aux essais intuitifs, il était possible d'inférer que cette activité reflétait une mobilisation du contrôle inhibiteur. Cette tâche permettait donc de vérifier l'hypothèse selon laquelle les participants du groupe expérimental mobiliseraient davantage le contrôle inhibiteur que les participants du groupe contrôle.

Cette tâche de comparaison de fractions est inspirée notamment de Gómez *et al.* (2015, 2019), mais a été adaptée pour la présente étude. En effet, l'utilisation de l'IRMf pose un certain nombre de contraintes, notamment liées au nombre de stimuli présentés aux participants dans l'appareil. Comme les tâches des études précédentes ne se déroulaient pas lors d'une séance d'IRMf, elles comportaient un nombre insuffisant d'items. Aux fins de la présente recherche, des items ont été repris des tâches des études antérieures et d'autres ont été ajoutés. La tâche conçue comprenait donc 48 paires différentes de fractions qui étaient présentées deux fois, pour un total de 96 items. Lors de la deuxième présentation, les paires étaient inversées (la fraction de droite était positionnée à gauche et vice-versa). Les 96 items ont été divisés en trois séries de 32 items, qui étaient présentés aléatoirement pour chaque participant. Les 48 paires de fractions étaient réparties en quatre conditions, comme dans la plupart des tâches de comparaison de fractions des études antérieures. D'abord, la moitié des items (24) constituaient des items intuitifs et l'autre moitié des items contre-intuitifs. Puis, afin d'éviter que les participants puissent « automatiser » une stratégie de réponse (p. ex., « lorsque le dénominateur est identique, je peux me fier à mon intuition, et lorsque c'est le numérateur qui est identique, je dois répondre l'inverse de mon intuition »), des paires de fractions ne comportant aucun nombre (composante) identique étaient incluses. Les quatre conditions étaient donc les suivantes : items intuitifs avec composante identique, intuitifs sans composante identique, contre-intuitifs avec composante identique et contre-intuitifs sans composante identique.

Comme mentionné, les 48 paires de fractions respectaient également certains critères d'équivalence, afin d'isoler au mieux le processus du contrôle inhibiteur : il s'agit de fractions « propres » (dont le numérateur est plus petit que le dénominateur), irréductibles, aucune d'entre

elles n'avaient 10 comme dénominateur et le dénominateur était toujours inférieur à 20. Par ailleurs, il est documenté que plus la distance numérique entre deux fractions augmente, plus le niveau de difficulté de l'item diminue (Meert *et al.*, 2010). Ainsi, pour éviter qu'un temps de réponse plus long pour les items contre-intuitifs ne soit associé qu'à une plus petite distance entre les fractions plutôt qu'au *natural number bias*, la distance entre les fractions a également été prise en compte. En effet, la distance numérique moyenne entre les deux valeurs des fractions des paires était de 0,24 pour la condition intuitive ($ET = 0,04$) et de 0,25 pour la condition contre-intuitive ($ET = 0,07$). Aucune différence significative concernant la distance entre les deux fractions d'une paire n'a été observée entre les quatre conditions de la tâche ($F = 0,182$; $p = 0,908$). La série complète des 48 paires de fractions est présentée à l'Annexe F.

Lors de la passation, chaque paire de fractions était présentée jusqu'à ce que le participant appuie sur un bouton, ou pour une durée maximale de cinq secondes, avant que la rétroaction ne soit présentée. Les participants de l'étude de Gómez *et al.* (2019) ayant le même âge que les participants de la présente étude (10-12 ans) ont pris de 2 à 3,5 secondes pour répondre à des items similaires de comparaison de fractions. Cette durée maximale leur laissait donc un temps de réponse raisonnable, sans les presser outre mesure. Tel que mentionné, la rétroaction corrective était ensuite donnée au participant en lui indiquant par un crochet vert ou un « x » rouge si sa réponse était correcte ou incorrecte, accompagnée des illustrations à l'aide de cercles, pour une durée de 3,5 secondes. Entre chaque item (stimulus et rétroaction), une croix de fixation apparaissait pour une durée aléatoire variant entre 2 et 3 secondes. Ce type de protocole constitue un protocole événementiel dans lequel chaque événement (en l'occurrence, chaque paire de fractions et chaque rétroaction) est suivi d'un temps de repos (pendant lequel la croix de fixation est présentée) (Masson et Borst, 2018). Le temps de passation total de la tâche était d'environ 20 minutes.

Cette tâche a donc permis de collecter des données en lien avec l'activité des régions cérébrales liées au contrôle inhibiteur. À cette fin, l'activité cérébrale étudiée était celle associée aux moments où le participant répondait aux items. Les temps de réponse ont également été mesurés afin de trianguler les données concernant le contrôle inhibiteur, des temps de réponse plus longs constituant un indice de processus plus complexe, dont le contrôle inhibiteur (Babai *et al.*, 2015). Ces deux mesures permettaient de récolter des données pour répondre à l'hypothèse 2 de la recherche concernant le contrôle inhibiteur. Les taux de réussite ont aussi été consignés pour

fournir une mesure de la performance à la tâche, permettant de répondre à l'hypothèse 3. Finalement, l'activité cérébrale associée aux moments où le participant recevait une rétroaction négative permettait de vérifier si la réaction face à l'erreur différait selon le groupe et ainsi répondre à l'hypothèse 4.

Toutefois, malgré les nombreuses précautions présentées précédemment afin de contrôler un maximum de variables possible dans la conception de la tâche de comparaison de fractions, les résultats obtenus présentaient un schéma particulier de réponses dans les conditions 3 et 4, soit les conditions ne comportant aucune composante identique. En effet, les items contre-intuitifs ont été largement mieux réussis que les intuitifs, ce qui a d'abord été surprenant. Ce résultat ne permettait donc pas de conclure que les participants s'étaient bel et bien appuyés sur l'automatisme prévu pour répondre, et soulevait l'hypothèse d'une autre variable explicative, non contrôlée entre les conditions. Comme les distances entre les fractions ne pouvaient pas être la source de cette différence (car elles étaient identiques), nous avons analysé tous les items des conditions 3 et 4 pour identifier des caractéristiques pouvant expliquer ce résultat inattendu. En examinant les données et les stimuli, il est apparu que plusieurs items contre-intuitifs représentaient une fraction pour laquelle « il ne manque qu'un morceau pour faire un tout », (p. ex. $\frac{4}{5}$), comparativement aux items intuitifs. Cela semble avoir fait en sorte que, plutôt que de se fier à l'automatisme prévu (se fier au nombre le plus grand), les participants aient comparé chaque fraction à un entier, ce qui leur aurait rendu la tâche plus facile dans la condition contre-intuitive. Cette hypothèse est cohérente avec les temps de réponse obtenus, appuyant l'idée que les participants n'ont pas effectué ce qui était prévu (se fier à l'automatisme pour répondre). Comme ces conditions n'étaient pas équivalentes sur ce point (distance avec 1), elles comportaient des variables confondantes qui ajoutent du bruit dans les données. Certains auteurs soulignent en effet la possibilité que les élèves utilisent des stratégies différentes de l'automatisme anticipé (*natural number bias*) ou de l'algorithme approprié, comme la stratégie du *gap thinking* (Van Hoof *et al.*, 2020). Cette stratégie consiste à comparer la différence absolue entre le numérateur et le dénominateur de chaque fraction et conclure que la fraction la plus grande est celle dont la différence est la plus petite. Comme la stratégie du *gap thinking* n'entraîne pas le même effet sur les items « avec » et « sans » composante identique et que l'inclusion d'items « sans composante identique » entraîne davantage de variabilité dans les stratégies utilisées, certains chercheurs décident de considérer ces items comme

buffers seulement, c'est-à-dire des distracteurs (Van Hoof *et al.*, 2020). Ainsi, les conditions « sans composante identique » ne constituant pas les conditions d'intérêt d'une part, et d'autre part, les participants ne semblant pas s'être appuyés sur l'automatisme prévu pour répondre, ces données n'ont finalement pas été prises en compte et seules les données des conditions 1 et 2 ont été analysées. En retirant les conditions 3 et 4, la distance entre les fractions demeurerait équivalente entre les conditions 1 et 2 seulement ($t = -0,084$; $p = 0,934$). Puis, les données extrêmes concernant les temps de réponse et les taux de réussite à la tâche ont été identifiées, puis exclues des analyses. Trois participants ont été écartés sur la base de ce critère.

3.5 Analyse des données comportementales

Les données comportementales (temps de réponse et taux de réussite) ont été analysées à l'aide du *Statistical Package for the Social Sciences (SPSS28)*.

Concernant les données motivationnelles (hypothèse 1), une analyse de variance (ANOVA) à mesures répétées à deux facteurs (*Groupe x Temps*) était initialement prévue. Cependant, en raison d'un effet plafond, les données ne respectaient pas la normalité requise pour ce type d'analyse. Par conséquent, nous avons dû opter pour des tests non paramétriques, pour lesquels il n'est pas possible de réaliser une seule analyse pour vérifier l'effet d'interaction comme prévu initialement. Nous avons donc d'abord effectué un test U de Mann-Whitney pour vérifier s'il existe une différence significative entre les groupes en prétest et en posttest. Ensuite, nous avons examiné si des différences significatives existaient entre les mesures prises avant et après l'intervention au sein de chaque groupe en utilisant le test de Wilcoxon. Cette approche nous a permis d'évaluer les changements de motivation de manière plus appropriée, compte tenu des contraintes liées aux données.

Les données en lien avec le contrôle inhibiteur (hypothèse 2), soit les temps de réponse mesurés pour chaque item, ont fait l'objet d'une ANOVA à mesures répétées à deux facteurs, soit le facteur *Groupe* (enseignement neuroplasticité vs enseignement contrôle) et le facteur *Condition* (intuitive vs contre-intuitive). Cette analyse permet de trianguler ces résultats avec les résultats cérébraux visant à mesurer l'activité cérébrale en lien avec le contrôle inhibiteur, afin de vérifier si les participants du groupe expérimental ont mobilisé davantage le contrôle inhibiteur que les

participants du groupe contrôle, ce qui se refléterait d'une part par des temps de réponse plus longs pour les items contre-intuitifs. Puis, les données comportementales en lien avec la performance à la tâche (hypothèse 3), soit les taux de réussite, ont également été analysées à l'aide d'une ANOVA à mesures répétées à deux facteurs (*Groupe x Condition*). Cela permet de comparer les effets des deux interventions sur le plan de la performance à la tâche en vérifiant si les participants du groupe expérimental ont mieux réussi les items contre-intuitifs que les participants du groupe contrôle.

3.6 Analyse des données cérébrales

Avant de procéder à l'analyse des données cérébrales en tant que telle, les données recueillies en IRMf doivent d'abord être prétraitées afin d'améliorer le rapport signal sur bruit dans les données et les préparer à la comparaison de groupes. Les étapes de prétraitement sont donc d'abord présentées, suivies du traitement statistique des données.

3.6.1 Étapes de prétraitements

Les analyses cérébrales ont été réalisées à l'aide du logiciel *Statistical Parametric Mapping (SPM8)* (Functional Imaging Laboratory, 2017) fonctionnant sous *MATLAB*, l'un des logiciels les plus utilisés en neuroimagerie (Pauli *et al.*, 2016). Les étapes de prétraitement sont les suivantes : correction du mouvement, normalisation et lissage (Masson et Borst, 2018). Puisqu'il arrive que de légers mouvements de la tête se produisent dans l'IRM, la correction du mouvement permet de réaligner l'image du cerveau de façon à ce qu'une région cérébrale demeure précisément à la même position durant toute la séance. L'algorithme utilisé pour réaliser cette correction est celui de SPM8 développé par Friston *et al.* (1996), qui permet d'aligner, à l'aide de translations et rotations, les images obtenues par rapport à l'image de référence calculée par SPM.

La normalisation, quant à elle, permet ensuite de comparer les cerveaux des participants entre eux en localisant les régions cérébrales de chacun sur un cerveau de référence. En effet, comme des différences dans la morphologie cérébrale peuvent exister entre les participants, il est important de normaliser les images en localisant les régions cérébrales de chaque participant sur un cerveau de référence à l'aide des coordonnées spatiales des voxels. Les données de la présente recherche ont

été normalisées à l'aide de la méthode de la segmentation intégrée dans SPM8 (Ashburner et Friston, 2005).

Enfin, le lissage permet de répartir le signal (d'activité cérébrale) d'un voxel (soit un pixel en trois dimensions, représentant un volume) aux voxels voisins et ainsi améliorer le rapport signal sur bruit, ce qui réduit le risque d'observer de faux positifs (c'est-à-dire, des activations qui semblent significatives mais ne le sont pas vraiment, aussi appelées *erreurs de type I*). On utilise généralement dans les études en IRMf un filtre gaussien d'un rayon allant de 6 mm à 10 mm FWHM (*Full Width at Half Maximum*), correspondant à la taille de 2 à 3 voxels, la taille d'un voxel dans cette recherche étant de 3 mm³ (Huettel *et al.*, 2008). Pour ce projet, un lissage de 8 mm à la moitié de la hauteur maximale (FWHM) a été effectué.

Une fois les étapes de prétraitements réalisées, une analyse visuelle de la qualité des images (mouvement excessif, artefacts, etc.) est effectuée afin de s'assurer que les données cérébrales ont bien été prétraitées et qu'elles sont d'une qualité suffisante pour le traitement statistique des données. À la suite de cette analyse, aucun participant n'a été exclu pour du mouvement excessif, mais un participant a été retiré en raison d'un problème technique avec l'acquisition des images (grande partie du cerveau manquante).

3.6.2 Traitement statistique des données

Comme dans les autres études qui utilisent des données quantitatives, les recherches en neuroéducation utilisant l'IRMf utilisent la valeur p pour évaluer la signification statistique. En psychologie et en éducation, le seuil standard généralement utilisé pour un test statistique est $p < 0,05$. Cependant, en IRMf, les tests statistiques portent sur un très grand nombre de voxels. À un seuil de $p < 0,05$, lorsqu'on effectue des analyses sur l'ensemble du cerveau, cela pourrait donc entraîner un nombre élevé de faux positifs (*erreurs de type I*), même en l'absence de stimulus (Nichols et Hayasaka, 2003; Smith, 2004). En d'autres mots, plus on effectue de tests statistiques, plus le risque de faux positifs augmente, ce qui fait référence au problème des comparaisons multiples. Afin de minimiser ce problème, il est possible d'appliquer différentes méthodes de correction, comme la correction de type « familywise error rate (FWE) » ou « false discovery rate (FDR) », cette dernière étant moins stricte que la première (Huettel *et al.*, 2008; Poldrack *et al.*,

2011). Ces méthodes ajustent les seuils de significativité en fonction du nombre de tests réalisés, réduisant ainsi le risque de faux positifs. On parle alors de *seuils corrigés* pour les comparaisons multiples, en comparaison avec des *seuils non corrigés*.

Cependant, il est essentiel de trouver un équilibre entre le risque d'erreurs de type I (conclure à tort qu'il existe une différence significative) et de type II (conclure à tort qu'il n'existe aucune différence significative). Une approche intermédiaire consiste à réaliser des analyses statistiques au niveau de groupes de voxels (*clusters*) dépassant un certain seuil au niveau du pic (dans cette étude, le seuil au niveau du pic utilisé est de $p < 0,005$) plutôt qu'au niveau de chaque voxel individuel, offrant une plus grande sensibilité pour déceler les activations, par rapport à l'analyse voxel par voxel. Dans le cadre de ce projet, en raison de la perte de données due au retrait de deux conditions, la puissance statistique a été plus faible que prévue, augmentant ainsi les risques d'erreur de type II. Par conséquent, nous avons opté pour l'utilisation d'un seuil corrigé (de type FWE) au niveau du *cluster*. Toutefois, il est important de noter que cette correction peut potentiellement diminuer la puissance statistique au point de ne pas être suffisante pour détecter des différences significatives à ce seuil corrigé. Dans un tel cas, nous présenterons tout de même les résultats à un seuil non corrigé, mais en utilisant un seuil dix fois plus strict que le seuil habituel de $p < 0,05$ (soit $p < 0,005$), puisqu'en raison des comparaisons multiples en IRMf, un seuil de 0,01 impliquerait un trop grand risque d'erreurs de type I (faux positifs). L'utilisation d'un seuil non corrigé pour certains résultats mène à être prudent dans leur interprétation.

Afin de vérifier si des régions sont significativement activées, les analyses statistiques reposent généralement sur le modèle linéaire général (Smith, 2004), ce qui a été fait dans la présente recherche. Ce modèle suppose qu'il est possible de modéliser ou d'estimer les données expérimentales (y) en combinant de façon linéaire différents facteurs, ou variables explicatives, (χ) détenant différentes pondérations (β), ainsi qu'une valeur d'erreur (ε), c'est-à-dire la variabilité que le modèle ne permet pas d'expliquer. Le modèle est représenté par la formule suivante :

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

Les facteurs dépendent notamment du design de l'expérience (p. ex., ordre de présentation des stimuli), mais également de l'activation de base et de facteurs liés à la dérive temporelle du signal

associée à l'appareillage. La méthode des moindres carrés permet ensuite d'obtenir les valeurs des pondérations (β) qui permettent de minimiser l'erreur (ε). On obtient donc la matrice suivante, représentant les valeurs de chaque voxel à chaque moment :

$$Y = X\beta + \varepsilon \quad (2)$$

Ensuite, les pondérations (β) des différentes conditions ou des différents groupes peuvent être utilisées dans le cadre d'analyses statistiques classiques comme une analyse de la variance ou un test-t.

Pour obtenir une vue d'ensemble de l'activité cérébrale des participants, nous avons d'abord effectué une analyse de premier niveau, combinant pour chaque participant les images obtenues lors des différentes séries. Cette première analyse a permis d'obtenir une carte statistique reflétant l'activité cérébrale de chaque participant, pour chacune des comparaisons ciblées. Cependant, cette approche se limite à des inférences au niveau individuel et ne permet pas de faire des comparaisons entre les participants. Nous avons donc ensuite réalisé des analyses de second niveau, basées sur un modèle à effets aléatoires, qui permettent d'identifier des différences significatives au niveau du groupe, tout en tenant compte de la variabilité interindividuelle. Cette approche (*analyses à effets aléatoires*) permet de limiter l'impact d'activations extrêmes de certains participants sur les résultats globaux. Elle est donc adaptée pour généraliser les résultats à l'ensemble de la population étudiée.

Concernant l'effet de l'intervention sur le contrôle inhibiteur (hypothèse 2), l'analyse comme telle consistait ensuite en une ANOVA à mesures répétées à deux facteurs, soit le facteur *Groupe* (enseignement neuroplasticité vs enseignement contrôle) et le facteur *Condition* (intuitive vs contre-intuitive). Cela permet de faire ressortir l'effet de l'interaction de ces facteurs sur l'activité cérébrale, soit les régions cérébrales plus activées pour chaque intervention lors de la comparaison des essais intuitifs aux essais contre-intuitifs.

Finalement, au sujet de l'effet de l'intervention sur la réaction à la rétroaction (hypothèse 4), une ANOVA à mesures répétées à deux facteurs était également prévue, soit le facteur *Groupe* (enseignement neuroplasticité vs enseignement contrôle) et le facteur *Rétroaction* (positive vs

négative). Cela permet normalement de faire ressortir l'effet de l'interaction de ces facteurs sur l'activité cérébrale, soit les régions cérébrales plus activées pour chaque intervention lors de la soustraction des rétroactions positives aux rétroactions négatives. Or, en raison des taux de réussite élevés à la tâche de comparaison de fractions, les participants ont reçu très peu de rétroaction négative. Cela (combiné à la perte de deux conditions) a miné de façon considérable la puissance statistique, ne permettant pas de confirmer ou infirmer l'hypothèse. Les analyses prévues pour cette hypothèse n'ont donc pas été réalisées.

Par ailleurs, étant donné que notre étude se concentre sur des hypothèses de recherche concernant une région particulière du cerveau, nous pouvons également effectuer une analyse spécifique de cette région, appelée *région d'intérêt*. Dans une telle analyse, nous utilisons des masques qui correspondent à des zones cérébrales spécifiques pour comparer les activations. Cela restreint les analyses statistiques aux voxels de ces régions précises du cerveau, réduisant ainsi le nombre de tests statistiques effectués et ainsi le problème des comparaisons multiples. Pour cette étude, nous avons donc également réalisé une analyse par région d'intérêt du cortex préfrontal ventrolatéral, en nous basant sur l'hypothèse 2. Nous avons utilisé l'outil WFU PickAtlas (Maldjian *et al.*, 2003) afin de définir notre région d'intérêt.

3.6 Considérations éthiques

Afin de s'assurer que la présente recherche respectait l'éthique de la recherche avec des êtres humains, plusieurs considérations ont été prises en compte. D'abord, pour éviter d'induire un biais en lien avec l'objectif de la recherche, les participants ainsi que leurs parents ont été informés que le but de cette recherche était de mieux comprendre les mécanismes cérébraux liés à l'apprentissage des mathématiques. Aucune mention de l'état d'esprit ou du contrôle inhibiteur n'a été faite. Par ailleurs, la présence d'une intervention expérimentale et d'une intervention contrôle ne posait pas de difficulté éthique particulière, car aucune des deux interventions n'était susceptible de poser préjudice aux participants. En effet, elles fournissaient toutes deux des informations exactes et appuyées, mais différentes selon l'intervention. De plus, comme la vidéo sur la neuroplasticité a été envoyée à tous les enseignants et parents des participants après la recherche, les participants du groupe contrôle ont également pu profiter des possibles bénéfices de cette intervention, mais plus tard. Tel que recommandé par l'Université du Québec à Montréal (UQAM), la demande

d'approbation éthique du projet a été approuvée par le Comité d'éthique de la recherche vieillissement-neuroimagerie (approbation éthique n° CER VN 15-16-03) du CRIUGM, possédant une expertise spécifique quant à la recherche en IRMf. L'UQAM a ensuite donné son approbation éthique via un protocole d'« examen en mode désigné », qui s'appuyait sur l'approbation éthique du comité du CRIUGM. Le participant et son parent ont signé le formulaire de consentement (voir Annexe A) et les règles concernant la protection des données personnelles ont été respectées.

L'utilisation de l'IRMf est quant à elle sécuritaire et ne comporte aucun risque médical si les contre-indications (p. ex., présence d'un simulateur cardiaque, voir Annexe B) sont respectées (Poldrack *et al.*, 2011), ce qui a été fait avec diligence. Les participants ont été recrutés sur une base volontaire et ont été informés qu'ils pouvaient se retirer à tout moment, et ce, sans justification ni pénalité. Tous les éléments du formulaire de consentement ont été expliqués au participant et son parent et toutes leurs questions ont été répondues par l'expérimentatrice. Le formulaire a été signé par le parent responsable du participant et l'assentiment de l'enfant participant a été recueilli. Tous les renseignements obtenus ont été anonymisés et restent confidentiels. Une compensation monétaire de 150 \$ a été versée aux participants pour les frais de déplacement et pour les remercier d'avoir participé à l'étude. Finalement, une image du cerveau du participant leur a également été envoyée par courriel.

CHAPITRE IV

RÉSULTATS

Ce quatrième chapitre expose les résultats issus de l'analyse des données. Dans un premier temps, nous examinons les résultats comportementaux concernant la motivation des participants, puis ceux liés à leur performance (temps de réponse et taux de réussite) à la tâche de comparaison de fractions pour vérifier l'impact de l'intervention. Ensuite, les résultats relatifs à l'activité cérébrale sont présentés, en mettant en évidence les différences entre les deux groupes pour la différence entre les conditions intuitive et contre-intuitive.

Tel que mentionné au chapitre précédent, sur les 58 participants qui ont effectué la séance d'imagerie, 10 ont été retirés sur la base du critère relatif au questionnaire de présélection en mathématiques, trois parce que leurs résultats à la tâche de comparaison de fractions étaient considérés comme des données extrêmes et un en raison de données cérébrales inutilisables. L'échantillon final est donc constitué de 44 participants, soit 22 par groupe.

4.1 Résultats comportementaux

Les résultats comportementaux liés à la motivation sont d'abord présentés, suivis des résultats comportementaux à la tâche de comparaison de fractions, soit les temps de réponse et les taux de réussite.

4.1.1 Questionnaire motivationnel

Afin de vérifier si l'intervention avait un impact sur la motivation des participants (hypothèse 1), les scores motivationnels ont été mesurés en prétest et en posttest pour chacun des groupes. Tel que mentionné plus haut, les données montrent un fort effet plafond. En effet, comme chaque variable peut atteindre un score maximal de 6, on observe que les résultats pour chacune d'elles se situent très près de la limite maximale. Il s'agit d'une limite souvent présente dans les questionnaires portant sur l'état d'esprit, possiblement en raison d'un biais de désirabilité sociale que nous n'avons pas réussi à éliminer. Cet effet plafond viole la prémisse de normalité et nous a

contraints à utiliser des tests non-paramétriques. Dans cette catégorie de tests, il n'est pas possible d'effectuer une seule analyse et de vérifier l'effet d'interaction entre les facteurs (*Groupe x Temps*). Le test U de Mann-Whitney pour échantillons indépendants a donc d'abord permis de vérifier s'il y avait une différence entre les groupes en prétest, puis en posttest, pour chacune des variables motivationnelles : perception de la malléabilité des habiletés, perception de contrôle, perception de l'erreur, perception de compétence et score motivationnel total.

Le tableau 4.1 présente ces résultats. En prétest, il n'existe aucune différence significative entre les groupes, bien qu'il soit possible de constater que les scores du groupe expérimental soient systématiquement inférieurs à ceux du groupe contrôle. En posttest, aucune différence significative entre les groupes n'est observée non plus.

Tableau 4.1 Différences intergroupes en prétest et en posttest pour le questionnaire motivationnel

Prétest				
Variabiles motivationnelles	Groupe expérimental <i>n</i> = 22	Groupe contrôle <i>n</i> = 22	<i>U</i>	<i>p</i>
<i>Perception de la malléabilité des habiletés</i>	5,36 (0,87)	5,44 (0,87)	287,000	0,275
<i>Perception de contrôle</i>	5,33 (0,73)	5,36 (0,81)	258,000	0,699
<i>Perception de l'erreur</i>	4,98 (1,07)	5,56 (0,49)	313,500	0,084
<i>Perception de compétence</i>	4,33 (0,93)	4,84 (0,87)	312,000	0,099
<i>Score motivationnel total</i>	20,01 (2,58)	21,21 (1,80)	314,000	0,091
Posttest				
Variabiles motivationnelles	Groupe expérimental <i>n</i> = 22	Groupe contrôle <i>n</i> = 22	<i>U</i>	<i>p</i>
<i>Perception de la malléabilité des habiletés</i>	5,59 (0,56)	5,57 (0,44)	220,500	0,599
<i>Perception de contrôle</i>	5,71 (0,38)	5,50 (0,57)	191,000	0,204
<i>Perception de l'erreur</i>	5,42 (0,65)	5,58 (0,54)	271,000	0,475
<i>Perception de compétence</i>	4,73 (0,74)	4,90 (0,84)	287,000	0,289
<i>Score motivationnel total</i>	21,45 (1,58)	21,54 (1,52)	254,000	0,778

Puis, pour vérifier s'il existe une différence entre le prétest et le posttest à l'intérieur de chacun des groupes, nous avons réalisé le test de classement de Wilcoxon, soit l'alternative non-paramétrique

du test-t pour échantillons appariés. Le tableau 4.2 montre qu'il existe une différence entre le prétest et le posttest dans le groupe expérimental pour toutes les variables motivationnelles, excepté pour la perception de la malléabilité des habiletés. Dans le groupe contrôle, aucune différence significative n'est observée entre le prétest et le posttest.

Tableau 4.2 Différences intragroupes entre le prétest et le posttest pour le questionnaire motivationnel

Variables motivationnelles	Groupe expérimental n = 22		Groupe contrôle n = 22	
	Z	p	Z	p
Perception de la malléabilité des habiletés	-1,33	0,184	-0,60	0,548
Perception de contrôle	-2,31	0,021*	-0,90	0,369
Perception de l'erreur	-2,24	0,025*	-0,18	0,856
Perception de compétence	-2,96	0,003**	0,00	1,000
Score motivationnel total	-3,13	0,002**	-0,57	0,566

Note : * $p < 0,05$; ** $p < 0,01$.

Afin de vérifier tout de même ce qu'auraient montré les résultats pour des tests paramétriques, des ANOVAs à mesures répétées ont aussi été effectuées, malgré le fait que la prémisse de normalité des données ne soit pas respectée. Elles vont dans le même sens et montrent un effet d'interaction entre les facteurs *Groupe* et *Temps* pour le score motivationnel total ($F(1, 42) = 4,44$; $p = 0,041$; $\eta^2 = 0,096$) et la perception de l'erreur ($F(1, 42) = 4,57$; $p = 0,038$; $\eta^2 = 0,098$). Cela signifie que la différence entre le prétest et le posttest varierait en fonction du groupe, en l'occurrence que la différence pré-post serait significativement plus élevée dans le groupe expérimental que dans le groupe contrôle, pour ces deux variables. L'effet d'interaction pour la perception de compétence n'atteindrait pas tout à fait le seuil de significativité ($p = 0,057$) et ne serait pas significatif pour les autres variables motivationnelles (perception de la malléabilité des habiletés $p = 0,668$; perception de contrôle $p = 0,282$). Les figures 4.1 et 4.2 illustrent l'ensemble des résultats au questionnaire motivationnel de façon visuelle.

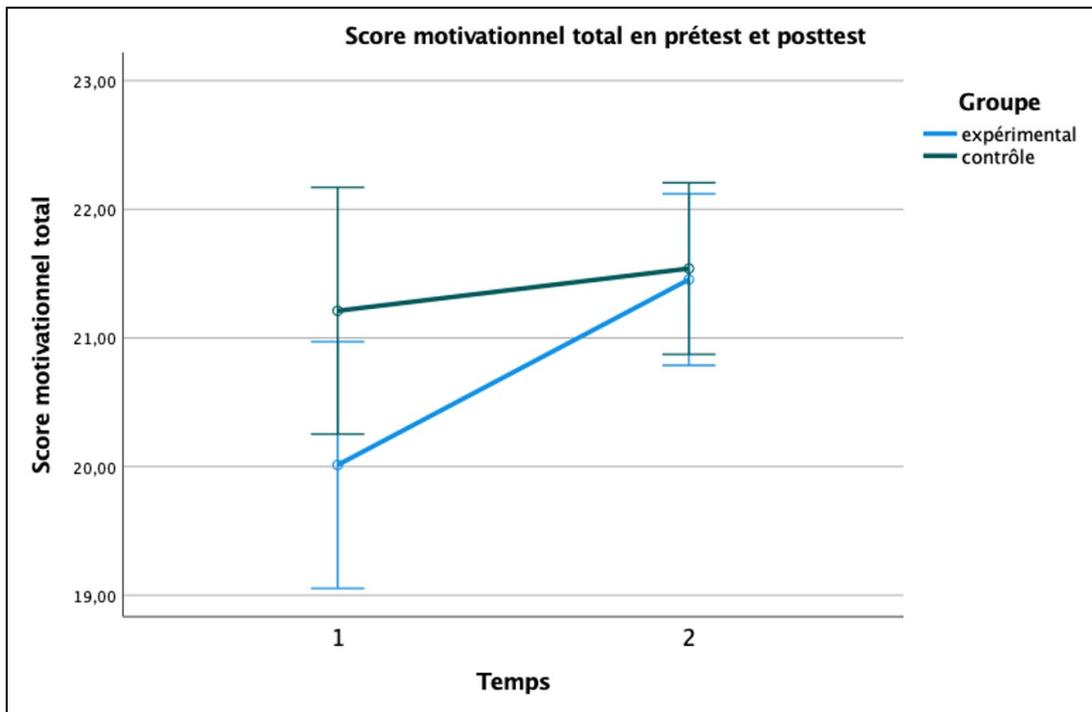


Figure 4.1 Score motivationnel total en prétest et posttest pour chacun des groupes.

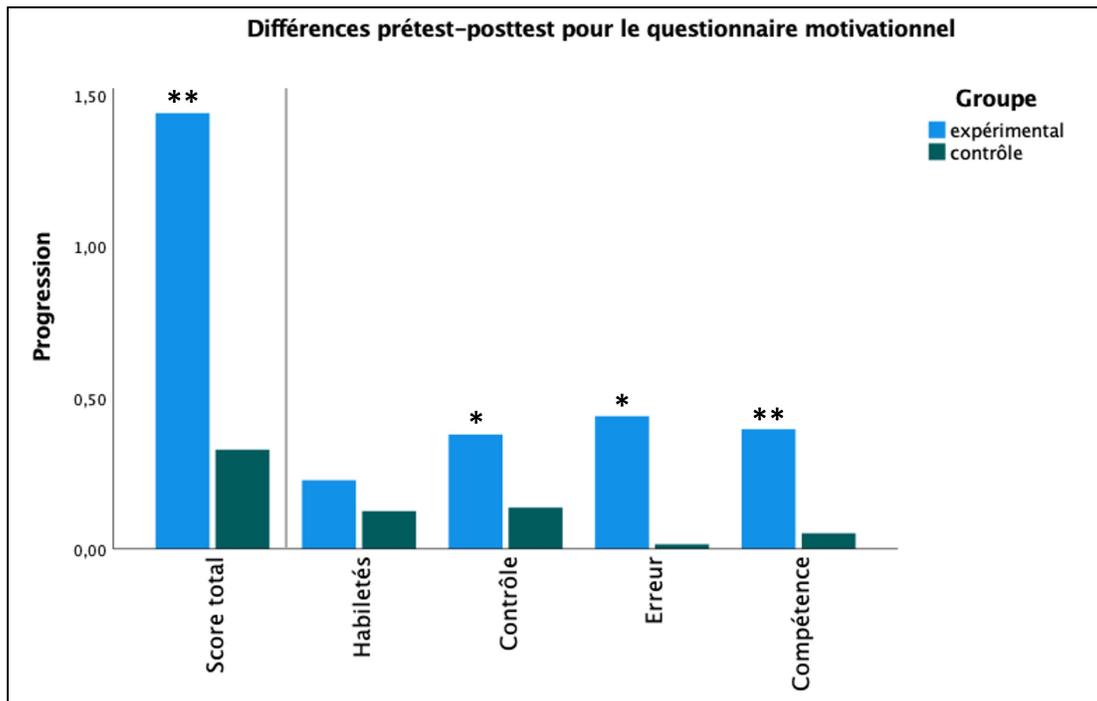


Figure 4.2 Différences entre le prétest et le posttest pour le questionnaire motivationnel.

Finalement, les tailles d'effet ont été calculées pour chacune des variables. Pour la perception de la malléabilité des habiletés, la taille d'effet obtenue est de $d = 0,13$, soit une petite taille d'effet (Cohen, 1988, 1992). La perception de contrôle et la perception de l'erreur affichent des tailles d'effet moyennes, soit $d = 0,47$ et $d = 0,43$, respectivement, et la perception de compétence $d = 0,35$, soit une taille d'effet entre « petite » et « moyenne ». La taille d'effet pour l'ensemble des variables combinées (score motivationnel total) est également moyenne, soit $d = 0,48$.

4.1.2 Tâche de comparaison de fractions

D'abord, afin de trianguler les résultats cérébraux concernant l'hypothèse relative au contrôle inhibiteur (hypothèse 2), les temps de réponse à la tâche de comparaison de fractions ont été mesurés. Comme l'objectif n'était pas de déterminer si la tâche nécessitait la mobilisation du contrôle inhibiteur, mais bien de déterminer si un groupe l'avait mobilisé davantage que l'autre, les temps de réponse pour tous les items (et non seulement les réussis) ont été analysés. Les résultats de l'ANOVA à mesures répétées à deux facteurs ne révèlent aucun effet d'interaction significatif entre le groupe et la condition ($F(1, 42) = 0,672$; $p = 0,417$; $\eta^2 = 0,016$; $d = 0,20$), ni d'effet de groupe ($p = 0,468$). L'effet de la condition est toutefois significatif ($F(1, 42) = 15,864$; $p < 0,001$; $\eta^2 = 0,274$; $d = 0,48$), les temps de réponse pour la condition contre-intuitive étant plus longs que pour la condition intuitive, appuyant le besoin de mobiliser le contrôle inhibiteur dans la condition contre-intuitive. Les tableaux 4.3 et 4.4 et la figure 4.3 présentent ces résultats.

Tableau 4.3 Temps de réponse en millisecondes à la tâche de comparaison de fractions

Condition	Groupe expérimental $n = 22$		Groupe contrôle $n = 22$		d
	Moyenne	Écart-type	Moyenne	Écart-type	
<i>Intuitive</i>	1850	296	1754	338	0,20
<i>Contre-intuitive</i>	1970	309	1937	328	

Tableau 4.4 Résultats de l'analyse de variance à mesures répétées pour les temps de réponse

Facteur	SC	ddl	CM	F	p	η^2 partiel
Condition	506 998	1	506 998	15,86	< 0,001	0,274
Condition * Groupe	21 489	1	21 489	0,672	0,417	0,016
Erreur (Temps)	1 342 318	42	31 959			

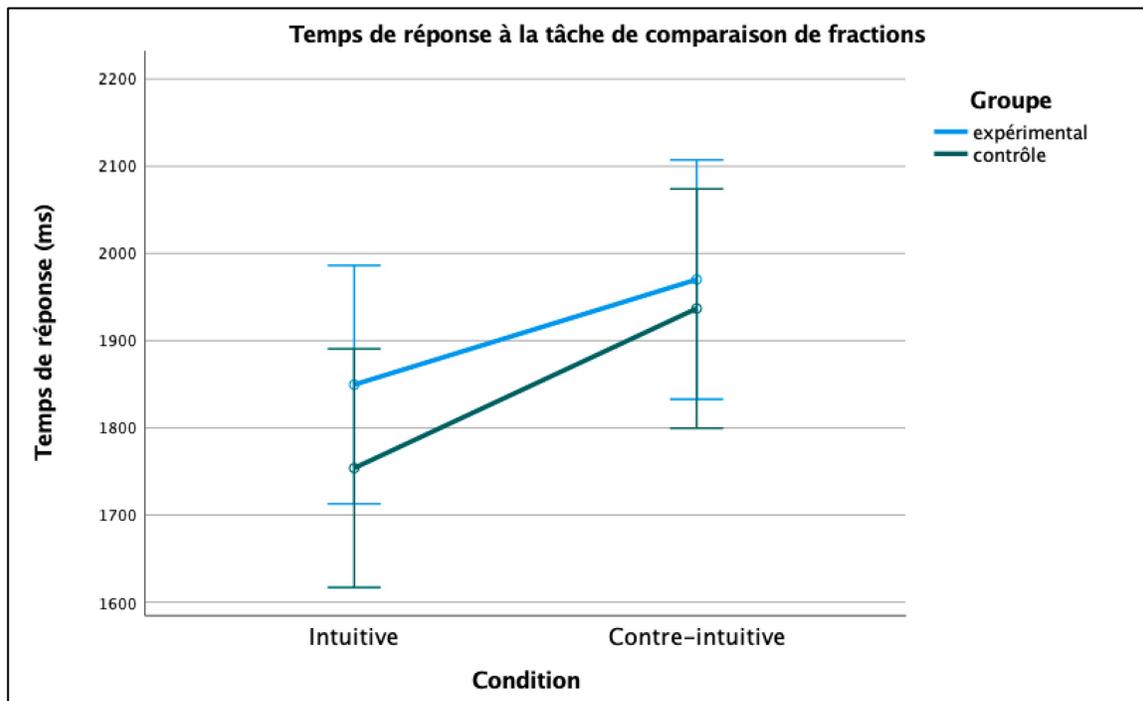


Figure 4.3 Temps de réponse, en millisecondes, à la tâche de comparaison de fractions pour chaque groupe.

Concernant les taux de réussite à la tâche de comparaison de fractions, en lien avec l'hypothèse 3, les résultats de l'ANOVA à mesures répétées à deux facteurs (*Groupe x Condition*) ne révèlent aucun effet d'interaction significatif ($F(1, 42) = 0,574; p = 0,453; \eta^2 = 0,013; d = 0,27$), ni d'effet de groupe ($p = 0,879$). L'effet de la condition est toutefois significatif ($F(1, 42) = 12,34; p = 0,001; \eta^2 = 0,227; d = 0,64$), les taux de réussite pour la condition contre-intuitive étant plus faibles que pour la condition intuitive, appuyant également l'idée de la nécessité du contrôle inhibiteur dans cette condition. Les tableaux 4.5 et 4.6 et la figure 4.4 présentent ces résultats.

Tableau 4.5 Taux de réussite en pourcentage à la tâche de comparaison de fractions

Condition	Groupe expérimental $n = 22$		Groupe contrôle $n = 22$		d
	Moyenne	Écart-type	Moyenne	Écart-type	
<i>Intuitive</i>	92,80	6,58	93,56	7,90	0,27
<i>Contre-intuitive</i>	89,02	8,29	87,69	7,66	

Tableau 4.6 Résultats de l'analyse de variance à mesures répétées pour les taux de réussite

Facteur	SC	ddl	CM	F	p	η^2 partiel
Condition	513,04	1	513,04	12,34	0,001	0,227
Condition * Groupe	23,88	1	23,88	0,574	0,453	0,013
Erreur (Temps)	1 746,22	42	41,58			

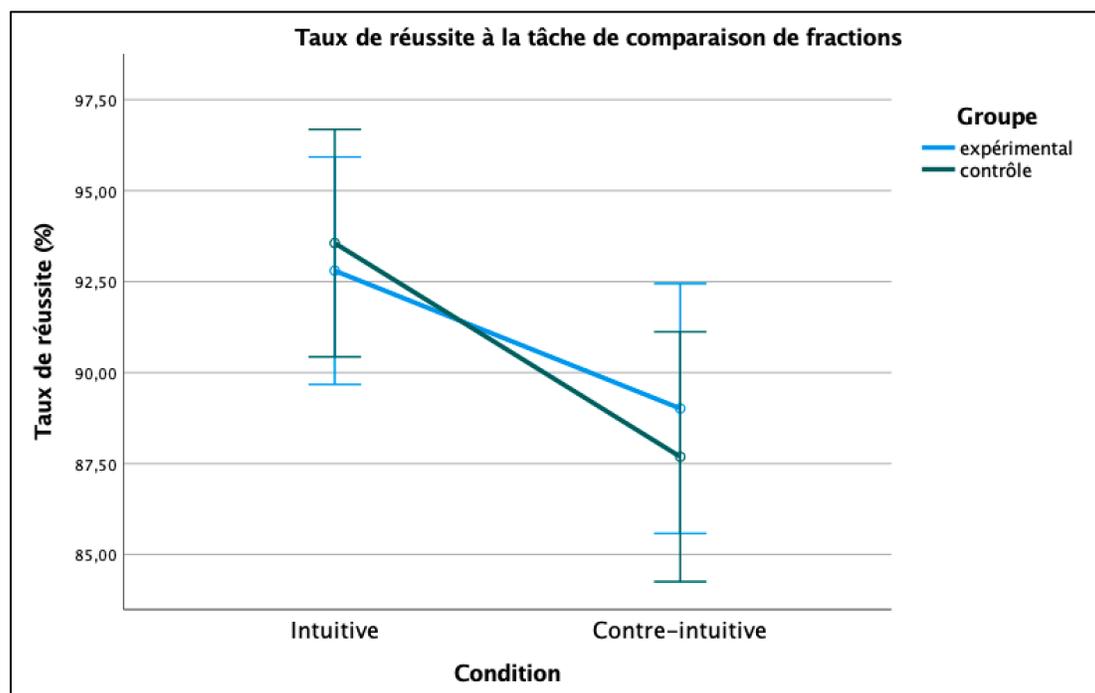


Figure 4.4 Taux de réussite, en pourcentage, à la tâche de comparaison de fractions pour chaque groupe.

4.2 Résultats cérébraux

Cette section présente les résultats cérébraux liés à la différence entre l'activité cérébrale des deux groupes lors de la comparaison des essais intuitifs et contre-intuitifs (réussis et échoués), afin de vérifier l'effet de l'intervention sur l'activité du cerveau (hypothèse 2). Tel que mentionné au

chapitre précédent, le manque de puissance statistique pour les résultats en lien avec la rétroaction négative (hypothèse 4) n'a pas permis de confirmer ou d'infirmer cette hypothèse. Seuls les résultats en lien avec l'hypothèse 2 sont donc présentés dans cette section. La première partie de la section présente l'analyse du volume cérébral entier, et la deuxième partie présente l'analyse par région d'intérêt.

4.2.1 Analyse du volume cérébral entier

Les résultats obtenus pour le volume cérébral entier sont d'abord présentés, c'est-à-dire en utilisant une analyse de l'ensemble du cerveau (*whole brain analysis*). Les tableaux des résultats fournissent des informations sur les coordonnées *MNI* (*Montreal Neurological Institute*) des régions, les aires de Brodmann associées, la valeur de *F* (statistique de Fisher) et la valeur de *k* (nombre de voxels), qui représente la taille des régions identifiées.

D'abord, l'effet d'interaction de l'ANOVA (*Groupe x Condition*) est significatif pour trois activations cérébrales touchant le gyrus fusiforme droit, le putamen gauche et le cortex visuel associatif gauche. Le tableau 4.7 détaille ces résultats, qui sont significatifs à un seuil corrigé de type *family-wise error* (FWE) de $p < 0,05$ au niveau du cluster et basés sur des activations comprenant minimalement 20 voxels.

Tableau 4.7 Régions cérébrales significativement associées à l'interaction du groupe (expérimental/contrôle) et de la condition (intuitive/contre-intuitive) (ANOVA)

Régions cérébrales	Aire de Brodmann (BA)	Coordonnées			<i>F</i>	<i>k</i>	<i>p</i>
		<i>x</i>	<i>y</i>	<i>z</i>			
Gyrus fusiforme droit	BA 37	21	-39	-21	39,79	1958	< 0,001
Putamen gauche		-27	-3	18	26,54	413	< 0,001
Cortex visuel associatif gauche	BA 19	-36	-66	15	17,93	66	0,038

Note : Analyse à effets aléatoires, $p_{(FWE-cluster)} < 0,05$, min. 20 voxels. L'identification des régions est réalisée à partir de l'atlas Talairach (Talairach et Tournoux, 1988).

Afin de vérifier le sens des effets observés avec l'ANOVA, des tests-t pairés ont été réalisés. Les résultats sont aussi présentés à un seuil corrigé FWE de $p < 0,05$ au niveau du cluster. Toutefois,

afin de repérer le sens de l'interaction pour deux des régions significatives ci-haut (gyrus fusiforme droit et cortex visuel associatif gauche), il a fallu établir un seuil non corrigé de $p < 0,005$. Les seuils non corrigés sont donc identifiés dans le tableau plus bas à l'aide de la mention « *n. corr.* » et les trois régions identifiées dans l'interaction y sont identifiées en vert. L'aire de Brodmann correspondante, la valeur de t (statistique de Student) et la valeur de k (nombre de voxels) correspondant à la taille des régions sont présentées dans le tableau 4.8.

Tableau 4.8 Régions cérébrales significativement plus activées pour chacun des groupes (expérimental/contrôle) et chacune des conditions (intuitive/contre-intuitive) (tests-t pairés)

Régions cérébrales	Aire de Brodmann (BA)	Coordonnées			<i>t</i>	<i>k</i>	<i>p</i>
		<i>x</i>	<i>y</i>	<i>z</i>			
Groupe expérimental							
<i>Contre-intuitif > Intuitif</i>							
Gyrus fusiforme droit	BA 37	36	-36	-18	4,33	17	< 0,001 (<i>n. corr.</i>)
Cortex préfrontal ventrolatéral gauche/Cortex préfrontal dorsolatéral gauche	BA 46/44	-45	27	18	5,15	363	= 0,001
Noyau caudé droit		-3	0	24	5,62	214	0,020
<i>Intuitif > Contre-intuitif</i>							
Aucune région significativement plus activée							
Groupe contrôle							
<i>Contre-intuitif > Intuitif</i>							
Aucune région significativement plus activée							
<i>Intuitif > Contre-intuitif</i>							
Putamen gauche		-27	-12	12	5,36	580	< 0,001
Cortex visuel associatif droit	BA 19	33	-69	-3	5,87	2958	< 0,001
Stimuli intuitifs							
<i>Expérimental > Contrôle</i>							
Aucune région significativement plus activée							
<i>Contrôle > Expérimental</i>							
Cortex visuel associatif gauche	BA 19	-36	-63	21	3,27	16	= 0,001 (<i>n. corr.</i>)
Stimuli contre-intuitifs							
<i>Expérimental > Contrôle</i>							
Aucune région significativement plus activée							
<i>Contrôle > Expérimental</i>							
Aucune région significativement plus activée							

Note : Analyse à effets aléatoires, $p_{(FWE-cluster)} < 0,05$, excepté seuils identifiés, min. 0 voxel. L'identification des régions est réalisée à partir de l'atlas Talairach (Talairach et Tournoux, 1988). Les régions identifiées dans l'effet d'interaction sont identifiées en vert.

Ces tests-t nous permettent donc d’observer que les trois régions significatives dans l’effet d’interaction (identifiées en vert dans le tableau) sont liées à des contrastes différents : le gyrus fusiforme droit est plus activé pour le contraste *contre-intuitif* > *intuitif* dans le groupe expérimental, le putamen gauche pour le contraste *intuitif* > *contre-intuitif* dans le groupe contrôle et le cortex visuel associatif gauche pour le contraste *Contrôle* > *Expérimental* dans les stimuli intuitifs.

On note toutefois dans les résultats des tests-t trois autres contrastes significatifs à un seuil corrigé, soit une activation couvrant le cortex préfrontal ventrolatéral et légèrement le cortex préfrontal dorsolatéral, et une autre associée au noyau caudé droit pour le contraste *contre-intuitif* > *intuitif* dans le groupe expérimental, ainsi qu’une dernière dans le cortex visuel associatif droit pour le contraste *intuitif* > *contre-intuitif* dans le groupe contrôle. Afin de vérifier si ces activations significatives se retrouvaient également dans les résultats de l’effet d’interaction de l’ANOVA initiale, nous y avons appliqué un seuil non corrigé de $p < 0,005$. Le tableau 4.9 présente donc ces trois autres activations dans l’effet d’interaction, à un seuil non corrigé.

Tableau 4.9 Régions cérébrales significativement associées à l’interaction du groupe (expérimental/contrôle) et de la condition (*intuitive/contre-intuitive*) (ANOVA, seuil non corrigé)

Régions cérébrales	Aire de Brodmann (BA)	Coordonnées			<i>F</i>	<i>k</i>	<i>p</i>
		<i>x</i>	<i>y</i>	<i>z</i>			
Cortex préfrontal ventrolatéral gauche	BA 44/45	-36	18	21	17,92	66	< 0,001
Noyau caudé droit		-3	0	24	15,03	2	< 0,001
Cortex visuel associatif droit	BA 19	24	-66	18	10,94	3	0,002

Note : Analyse à effets aléatoires, $p_{(n, corr.)} < 0,005$, min. 0 voxel. L’identification des régions est réalisée à partir de l’atlas Talairach (Talairach et Tournoux, 1988).

Une plus grande activation du cortex préfrontal ventrolatéral pour le contraste *contre-intuitif* > *intuitif* dans le groupe expérimental par rapport au groupe contrôle est d’un intérêt particulier puisqu’il rejoint l’hypothèse 2, prédisant une plus grande activation des régions cérébrales associées au contrôle inhibiteur (principalement le cortex préfrontal ventrolatéral) dans

le groupe expérimental, bien que le résultat soit significatif à un seuil non corrigé. Ce résultat sera interprété dans la discussion.

La figure 4.5A (section suivante) présente toutes les activations significatives à un seuil non corrigé pour l'effet d'interaction.

4.2.2 Analyse par région d'intérêt

Tel que mentionné précédemment, une analyse par région d'intérêt a été effectuée puisque l'hypothèse de départ ciblait une région spécifique, soit le cortex préfrontal ventrolatéral. Comme cette région est relativement grande (elle est en effet bilatérale et englobe trois sous-divisions), nous avons d'abord tenté de cibler le cortex préfrontal ventrolatéral gauche, puisque plusieurs recherches l'associent à des tâches mathématiques, notamment la comparaison de fractions (Ischebeck *et al.*, 2009; Wortha *et al.*, 2020). Nous avons ensuite utilisé trois masques, un pour chacune des sous-divisions du cortex préfrontal ventrolatéral : la *pars opercularis*, la *pars triangularis* et la *pars orbitaris*. Aucune hypothèse préalable n'a été formulée concernant la sous-division anticipée, car les spécificités de chacune d'elles sont encore plus ou moins bien définies dans la littérature. Lors des analyses, ces sous-divisions ont été définies à partir de l'outil WFU PickAtlas (Maldjian *et al.*, 2003). Les résultats pour la *pars opercularis* et la *pars orbitaris* ne montrent aucune activation significative à un seuil corrigé, alors que ceux pour la *pars triangularis* en montrent une de 36 voxels, présentée dans le tableau 4.10.

Tableau 4.10 Effet d'interaction du groupe (expérimental/contrôle) et de la condition (intuitive/contre-intuitive) par analyse par région d'intérêt avec masque latéralisé à gauche du cortex préfrontal ventrolatéral *pars triangularis*

Régions cérébrales	Aire de Brodmann (BA)	Coordonnées			F	k	p
		x	y	z			
Cortex préfrontal ventrolatéral	BA 44/45	-36	18	21	17,92	36	0,048

Note : Analyse à effets aléatoires, $p_{(FWE-cluster)} < 0,05$. Le masque est défini à partir du WFU Pickatlas. SPM calcule une taille de 36 voxels requise pour qu'un cluster soit considéré significatif dans ce cas.

Ainsi, les résultats de l'analyse par région d'intérêt montrent que l'effet d'interaction est significatif à un seuil corrigé FWE au niveau du cluster de $p < 0,05$ dans le cortex préfrontal ventrolatéral *pars triangularis* gauche ($p = 0,048$), bien que la taille du cluster soit tout juste à la limite de la taille

suffisante pour être considérée significative. La figure 4.5B montre cette activation. Aucune activation n'est significative pour les masques bilatéral et droit.

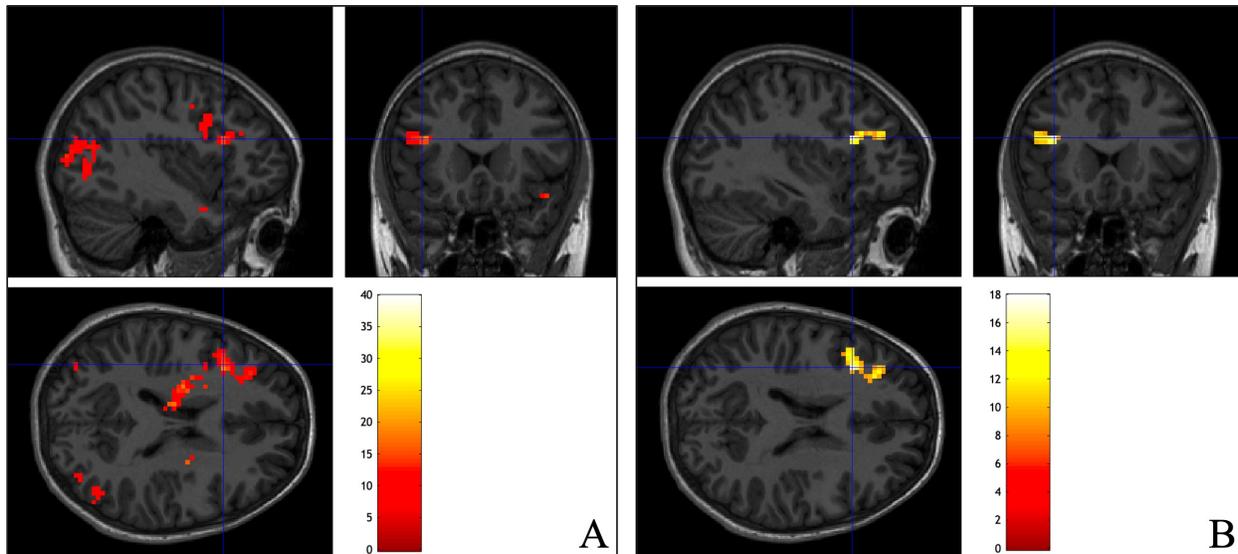


Figure 4.5 A. Analyse du volume cérébral entier : activations significatives à un seuil non corrigé $p_{(n. corr.)} < 0,005$ pour l'effet d'interaction. B. Analyse par région d'intérêt : activation significative du cortex préfrontal ventrolatéral gauche à un seuil corrigé $p_{(FWE-cluster)} < 0,05$ pour l'effet d'interaction.

Par ailleurs, afin d'observer de quelle façon l'effet d'interaction dans le cortex préfrontal ventrolatéral gauche reflète des différences dans l'activation ou la désactivation relative, les moyennes individuelles des valeurs bêta de cette activation ont été extraites pour les régresseurs des niveaux *intuitif* et *contre-intuitif*. Comme le montrent les tableaux 4.11 et 4.12 et la figure 4.6, une plus grande activation du cortex préfrontal ventrolatéral est observée dans le groupe expérimental pour la condition contre-intuitive, l'interaction de l'ANOVA (*Groupe x Condition*) étant significative ($F(1, 42) = 10,22; p = 0,003; \eta^2 = 0,196$), avec une taille d'effet moyenne de $d = 0,56$. Il est intéressant de noter que la moyenne des valeurs bêta pour ce contraste (*contre-intuitif* > *intuitif* dans le groupe expérimental) est la seule affichant une valeur positive.

Tableau 4.11 Valeurs bêta pour l'activation significative dans le CPVL gauche

Condition	Groupe expérimental $n = 22$		Groupe contrôle $n = 22$		d
	Moyenne	Écart-type	Moyenne	Écart-type	
<i>Intuitive</i>	-0,0590	2,00	-0,4240	2,84	0,56
<i>Contre-intuitive</i>	0,7596	1,93	-0,8479	2,58	

Tableau 4.12 Résultats de l'analyse de variance à mesures répétées pour les valeurs bêta de l'activation dans le CPVL gauche

Facteur	SC	ddl	CM	F	p	η^2 partiel
Condition	0,857	1	0,857	1,032	0,316	0,024
Condition * Groupe	8,49	1	8,49	10,217	0,003	0,196
Erreur (Temps)	34,90	42	0,831			

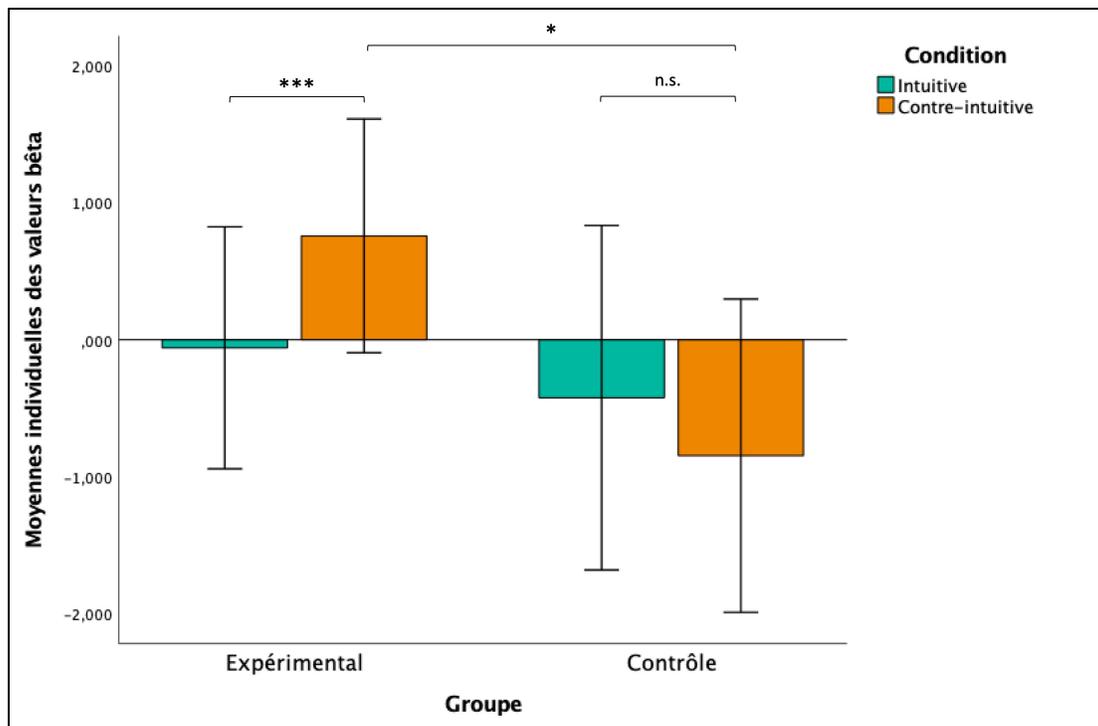


Figure 4.6 ANOVA pour les moyennes individuelles des valeurs bêta pour les conditions intuitive et contre-intuitive pour l'activation dans le cortex préfrontal ventrolatéral (-36 18 21, BA 44/45). * < 0,05; ** < 0,01; *** \leq 0,005.

4.2.3 Analyse complémentaire

Comme l'intervention a eu un impact significatif sur la motivation et l'activité cérébrale des participants du groupe expérimental, une analyse complémentaire a été effectuée afin de vérifier s'il existait une relation entre le changement dans la motivation et l'activité cérébrale dans le cortex préfrontal ventrolatéral (CPVL) gauche dans la condition contre-intuitive. Une régression linéaire multiple a donc été effectuée afin de vérifier dans quelle mesure les quatre variables motivationnelles pouvaient prédire l'activité cérébrale, c'est-à-dire déterminer le poids relatif de

chaque composante motivationnelle dans l'activité cérébrale. Le tableau 4.13 présente la matrice de corrélation issue de la régression linéaire effectuée.

Tableau 4.13 Matrice de corrélation pour la régression linéaire liée à l'activité cérébrale dans le CPVL gauche

Facteur	<i>N</i>	<i>r</i>	<i>p</i>
Changement dans la perception de la malléabilité des habiletés	44	0,09	0,57
Changement dans la perception de contrôle	44	0,14	0,36
Changement dans la perception de l'erreur	44	0,21	0,18
Changement dans la perception de compétence	44	0,32	0,04*

Note : * < 0,05

À l'aide de la matrice de corrélation, on remarque d'abord que la seule variable corrélée de façon significative à l'activité cérébrale est le changement dans la perception de compétence, avec un coefficient de taille moyenne (Cohen, 1988, 1992), $r = 0,32$, $p = 0,04$. Les corrélations entre les autres variables et l'activité cérébrale sont toutes non significatives.

Lors de la régression linéaire multiple, ces trois autres variables ont été exclues du modèle, les modèles les incluant n'étant pas significatifs. Le modèle retenu est celui n'incluant que le changement dans la perception de compétence ($F(1, 42) = 4,773$, $p = 0,04$). Le R^2 est de 0,102, indiquant que le changement dans la perception de compétence explique environ 10,2 % de la variance dans l'activité cérébrale. L'équation de régression est la suivante : $A = -0,328 + 1,27x$ (A représentant l'activité cérébrale et x représentant le changement dans la perception de compétence). Cela signifie que pour chaque augmentation d'un point dans la perception de compétence, l'activité cérébrale prédite augmente d'environ 1,27. Les intervalles de confiance indiquent qu'il est à 95 % certain que la pente permettant de prédire l'activité cérébrale à partir du changement dans la perception de compétence soit comprise entre 0,10 et 2,44.

4.3 Synthèse des résultats

Les résultats comportementaux concernant la motivation permettent d'observer une amélioration significative du score motivationnel total entre le prétest et le posttest pour le groupe expérimental,

mais pas pour le groupe contrôle. De la même façon, cette amélioration significative dans le groupe expérimental est présente pour chacune des variables motivationnelles, excepté la perception de la malléabilité des habiletés, et aucune différence n'est observée dans le groupe contrôle. Les effets de l'intervention sur les variables motivationnelles sont globalement de tailles moyennes. Quant à eux, les résultats à la tâche de comparaison de fractions ne permettent pas d'observer de différences significatives entre les groupes, que ce soit sur le plan des temps de réponse ou des taux de réussite.

Sur le plan cérébral, les résultats de l'ANOVA à plan factoriel révèlent notamment un effet d'interaction significatif (*Groupe x Condition*) dans le cortex préfrontal ventrolatéral gauche, à un seuil non corrigé. Les résultats des tests-t qui ont été menés afin de préciser le sens de cet effet d'interaction démontrent qu'il est induit par une différence significative de l'activité cérébrale entre la condition contre-intuitive et la condition intuitive dans le groupe expérimental. L'analyse par région d'intérêt indique que cet effet d'interaction est significatif à un seuil corrigé, avec une taille d'effet moyenne.

Finalement, les résultats de la régression linéaire multiple visant à déterminer les relations entre les quatre variables motivationnelles et l'activité cérébrale dans le cortex préfrontal ventrolatéral gauche montrent que seul le changement dans la perception de compétence prédit de façon significative l'augmentation de l'activité cérébrale liée au contrôle inhibiteur.

CHAPITRE V

DISCUSSION

Ce projet visait à répondre à la question de recherche suivante : quels sont les effets d'un enseignement du concept de neuroplasticité sur la motivation, la mobilisation du contrôle inhibiteur et la performance à une tâche contre-intuitive en mathématiques?

Afin de répondre à cette question, les différences entre un groupe expérimental, recevant l'enseignement du concept de neuroplasticité, et un groupe contrôle ont été étudiées. Les hypothèses de recherche se traduisaient de la façon suivante :

1. Une augmentation de la motivation dans le groupe expérimental, mesurée par un questionnaire motivationnel, sera observée suite à l'enseignement du concept de neuroplasticité, contrairement au groupe contrôle;
2. Comparativement au groupe contrôle, l'enseignement du concept de neuroplasticité dans le groupe expérimental favorisera davantage la mobilisation du contrôle inhibiteur lors des essais contre-intuitifs, reflétée à la fois par une plus grande activation des régions cérébrales associées au contrôle inhibiteur (principalement le cortex préfrontal ventrolatéral) ainsi que par des temps de réponse plus longs;
3. Cette mobilisation du contrôle inhibiteur sera associée à un taux de réussite plus élevé à la tâche dans le groupe expérimental, comparativement au groupe contrôle;
4. Lors des rétroactions négatives, une plus grande activation des régions cérébrales liées à l'attention (principalement le cortex préfrontal dorsolatéral) sera observée au sein du groupe expérimental, comparativement au groupe contrôle.

Comme il a été mentionné précédemment, il n'a pas été possible de confirmer ou d'infirmer l'hypothèse 4, soit celle relative à la réaction à la rétroaction négative, probablement en raison d'un manque de puissance statistique. Ce dernier chapitre a donc pour objectif d'interpréter les résultats

du chapitre précédent afin de confirmer ou d'infirmier les trois premières hypothèses de recherche et de discuter de l'ensemble des résultats. Les implications pédagogiques de la présente recherche seront ensuite exposées, suivies de ses limites et de quelques perspectives de recherche futures.

5.1 Interprétation des résultats

Cette première section interprète les résultats obtenus à la lumière des trois premières hypothèses de recherche, puis discute des résultats découlant de l'analyse complémentaire.

5.1.1 Hypothèse 1 : effets d'un enseignement de la neuroplasticité sur la motivation

À partir de la littérature au sujet des interventions visant à influencer l'état d'esprit chez les élèves, la première hypothèse prédisait une augmentation de la motivation dans le groupe expérimental à la suite de l'intervention, comparativement au groupe contrôle. Comme les recherches portant sur l'état d'esprit ont observé des résultats divergents et sujets à controverse, nous avons fait l'hypothèse que ces divergences étaient peut-être expliquées par le fait que plusieurs variables, liées mais distinctes, sont régulièrement intégrées dans la théorie et les questionnaires sur l'état d'esprit. Des variables confondantes peuvent ainsi induire du « bruit » dans les données, menant à des résultats incohérents. Nous avons donc fait la distinction entre quatre construits motivationnels se retrouvant régulièrement dans la littérature sur l'état d'esprit : la perception de la malléabilité des habiletés, la perception de contrôle, la perception de l'erreur et la perception de compétence. Un nouveau questionnaire motivationnel a été développé à partir de ces quatre variables, puis validé, afin d'être utilisé comme mesure de la motivation dans le présent projet, en prétest et en posttest.

On observe un fort effet plafond sur le plan des statistiques descriptives, la moyenne de chaque variable motivationnelle pour chacun des groupes étant déjà très près de la limite maximale en prétest. Comme mentionné plus haut, cet effet est souvent observé dans les questionnaires au sujet de l'état d'esprit, probablement en raison d'un biais de désirabilité sociale. En effet, les élèves se font souvent dire qu'ils peuvent s'améliorer ou que leurs erreurs sont des outils pour apprendre. Il est donc possible qu'ils répondent davantage en fonction de ce qu'ils croient attendu d'eux que ce qu'ils pensent vraiment. Les résultats des analyses non-paramétriques montrent tout de même que

l'enseignement de la neuroplasticité a eu un impact significatif dans le groupe expérimental sur la motivation de façon globale et sur toutes les variables motivationnelles, excepté la perception de la malléabilité des habiletés, bien que cet effet n'ait pas été suffisamment marqué pour entraîner une différence significative par rapport au groupe contrôle. On retrouve des tailles d'effet intéressantes, particulièrement pour une intervention d'environ 5 minutes, pour la perception de contrôle ($d = 0,47$), la perception de l'erreur ($d = 0,43$) et la perception de compétence ($d = 0,35$). Il semble toutefois qu'enseigner aux élèves que leur cerveau est malléable ne soit pas nécessairement suffisant pour augmenter leur perception de la malléabilité de leurs habiletés. Ce résultat est d'autant plus intéressant, puisque la perception de la malléabilité des habiletés fait référence à la croyance que les habiletés peuvent se développer, soit le cœur de la théorie de l'état d'esprit. En effet, plusieurs recherches ont observé qu'une intervention visant à induire un état d'esprit dynamique n'y était pas parvenue, c'est-à-dire que l'intervention pouvait parfois avoir un effet sur la réussite, mais sans avoir réussi à modifier l'état d'esprit des élèves (Sisk *et al.*, 2018). Ces résultats sont cohérents avec les résultats de la présente recherche : les résultats positifs obtenus sur la réussite dans les autres études sont peut-être attribuables à d'autres variables que la simple perception de la malléabilité des habiletés. En effet, nos résultats semblent démontrer qu'enseigner aux élèves non seulement que leur cerveau est malléable, mais aussi que d'autres facteurs peuvent aider leur cerveau à apprendre, comme la pratique, l'effort, porter attention à ses erreurs et croire en ses capacités, peut avoir un effet non négligeable sur leur perception de contrôle, de l'erreur et de leur compétence. Ces éléments ont donc peut-être un rôle important à jouer dans les effets observés. D'ailleurs, certains auteurs mettent en évidence que la majorité des interventions visant à faire prendre conscience aux élèves que leurs habiletés sont malléables incluent également des encouragements vis-à-vis de l'effort, de la pratique, de la persévérance, de l'utilisation de diverses stratégies, de la perception des erreurs, etc. (Macnamara et Burgoyne, 2023). Il est donc possible que la plupart des interventions visant à induire un état d'esprit dynamique influencent davantage ces variables, soit des construits plus périphériques dans la théorie de l'état d'esprit.

Les résultats de la présente recherche appuient globalement la première hypothèse : l'enseignement de la neuroplasticité a permis d'augmenter la motivation de façon significative dans le groupe expérimental, contrairement au groupe contrôle. On note plus spécifiquement que toutes les variables motivationnelles ont bénéficié de cette différence significative, excepté la perception de

la malléabilité des habiletés. Bien que l'absence de différence significative par rapport au groupe contrôle invite à la nuance, il est possible qu'elle soit en partie due à un manque de puissance statistique en raison de l'utilisation d'analyses non-paramétriques, ainsi qu'au fort effet plafond observé dans les données. Par ailleurs, la réduction qualitative de l'écart entre les groupes et la taille d'effet ($d = 0,48$) suggèrent également une amélioration liée à l'intervention. Ces résultats sont tout de même à interpréter avec prudence, également en raison des différentes limites du questionnaire (compréhension de la formulation des énoncés, énoncés spécifiques aux mathématiques, possible biais de désirabilité sociale, etc.).

5.1.2 Hypothèse 2 : effets d'un enseignement de la neuroplasticité sur la mobilisation du contrôle inhibiteur

La première partie de l'hypothèse concernant le contrôle inhibiteur prédisait dans le groupe expérimental, comparativement au groupe contrôle, une plus grande activation du cortex préfrontal ventrolatéral lors des essais contre-intuitifs comparativement aux essais intuitifs.

L'analyse du volume cérébral entier montre un effet d'interaction significatif pour une activation dans le CPVL gauche, à un seuil non corrigé, et le sens de cette interaction est retrouvé dans les résultats provenant des contrastes simples (test-t pairés). En cohérence avec l'hypothèse, cette différence reflète une plus grande activation du CPVL gauche dans la condition contre-intuitive, comparativement à la condition intuitive, pour le groupe expérimental, comparativement au groupe contrôle. Lors de l'analyse par région d'intérêt, cette activation est significative à un seuil corrigé avec une taille d'effet moyenne ($d = 0,56$), dans la sous-division du *pars triangularis*. Bien que la taille du cluster se situant tout juste à la limite de la taille minimale invite à la prudence, ce résultat mérite tout de même d'être considéré et discuté, étant cohérent avec l'hypothèse 2. Plusieurs recherches en IRMf associent le CPVL *droit* au contrôle inhibiteur (Messel *et al.*, 2019), mais plusieurs autres études et revues de la littérature insistent en effet sur l'importance du CPVL *gauche* dans ce mécanisme (Badre et Wagner, 2007; Chambers *et al.*, 2009; Swick *et al.*, 2008; Vidal *et al.*, 2012). Les recherches de Masson *et al.* (2014) et d'Allaire-Duquette *et al.* (2018) montrent également une plus grande activation du CPVL gauche lors de l'évaluation de stimuli contre-intuitifs en sciences. Par ailleurs, il semble que plusieurs études observent l'activation du CPVL gauche lors de tâches mathématiques (Rickard *et al.*, 2000; Wilkey et Price, 2019), notamment lors

de comparaisons de fractions, en condition contre-intuitive, suggérant la nécessité de mobiliser le contrôle inhibiteur dans cette condition (Ischebeck *et al.*, 2009; Wortha *et al.*, 2020).

Concernant les sous-divisions du CPVL, aucune hypothèse n'avait préalablement été formulée puisque les spécificités de chacune d'elles sont encore plus ou moins claires dans la littérature. De façon générale, il semble que CPVL postérieur soit davantage associé aux fonctions concrètes et motrices, alors que plus on tend vers la partie antérieure, plus les fonctions cognitives traitées sont abstraites (Hartwigsen *et al.*, 2019). Sur un axe postérieur-antérieur, on retrouve d'abord le *pars opercularis*, puis le *pars triangularis* et finalement le *pars orbitalis*, soit le plus antérieur (voir figure 5.1). Il semble toutefois que le *pars opercularis* (correspondant approximativement à la BA44) et le *pars triangularis* (correspondant approximativement à la BA45) aient des fonctions très similaires et fassent partie d'un même système (Bernal et Perdomo, 2008). On note d'ailleurs que l'activation significative obtenue dans la présente recherche se situe principalement dans le *pars triangularis*, mais se trouve très près de la jonction des deux sous-divisions (BA44/45). Ces deux sous-divisions sont régulièrement associées à la mémoire de travail ainsi qu'à l'inhibition d'une réponse (Bernal et Perdomo, 2008; Messel *et al.*, 2019). Elles sont par exemple plus activées dans des tâches de comparaison de fractions lorsque les items sont plus difficiles (en condition contre-intuitive [Ischebeck *et al.*, 2009] ou lorsque la distance numérique entre les deux fractions diminue [Wortha *et al.*, 2020]). Le *pars triangularis* semble plus spécifiquement être associé à un réseau plus large régulant le contrôle inhibiteur, incluant notamment l'insula, le noyau caudé et l'aire supplémentaire motrice (Boen *et al.*, 2022). Par ailleurs, une étude a aussi observé une augmentation de la surface et de l'épaisseur corticale dans le *pars triangularis* gauche après un entraînement au contrôle inhibiteur (à partir de tâches classiques d'inhibition, comme la tâche de *Stroop*), et cette augmentation était associée à une hausse de l'efficacité comportementale du contrôle inhibiteur, suggérant que ces changements structuraux semblent spécifiques à l'entraînement (Delalande *et al.*, 2020). Bien que le *pars orbitalis* soit lui aussi associé à la mémoire de travail et au contrôle inhibiteur, il semble être plus spécialisé que les deux autres sous-divisions dans le raisonnement émotionnel et motivationnel (Bernal et Perdomo, 2008). L'activation significative obtenue dans le *pars triangularis* dans la présente recherche pour le groupe expérimental lors de la condition contre-intuitive est donc cohérente avec la littérature, et reflète probablement une plus grande allocation de ressources attentionnelles aux stimuli numériques

contre-intuitifs, ainsi qu'une initiation du mécanisme de contrôle inhibiteur afin de freiner l'automatisme prédominant dans cette condition. Ces résultats sont également cohérents avec les trois études présentées au chapitre II (Mangels *et al.*, 2006; Moser *et al.*, 2011; Schroder *et al.*, 2017) étant arrivées à la conclusion, à l'aide de l'EEG, qu'un état d'esprit dynamique était associé à une plus grande attention aux éléments pertinents à la tâche.

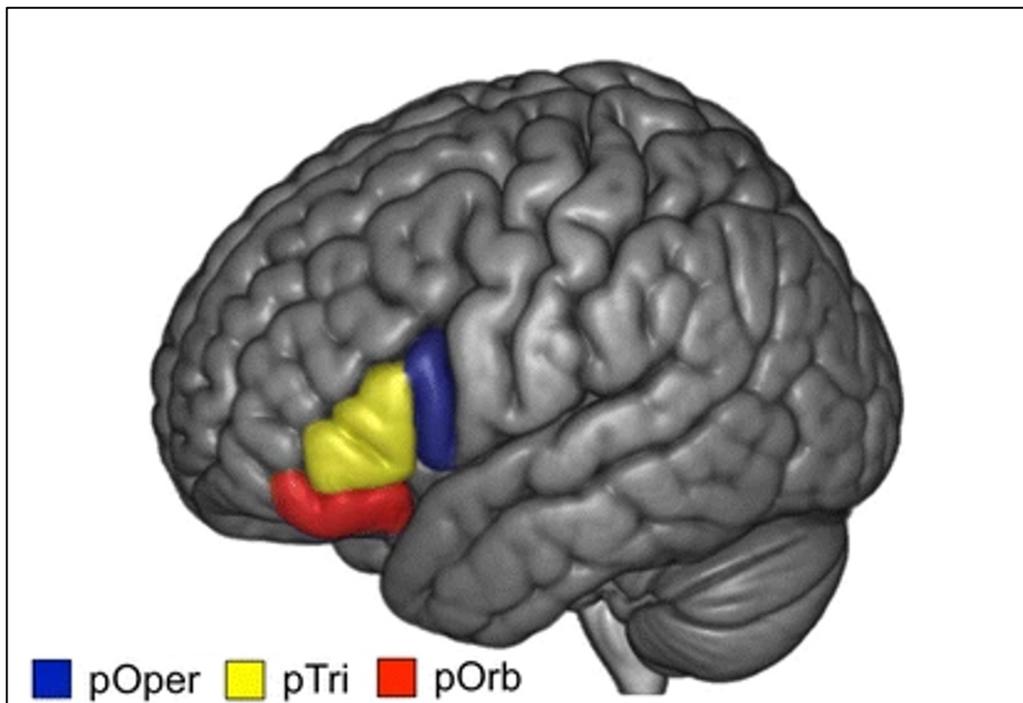


Figure 5.1 Sous-divisions anatomiques formant le cortex préfrontal ventrolatéral. pOper = *pars opercularis*, pTri = *pars triangularis*, pOrb = *pars orbitalis*. Figure adaptée de Matchin (2018).

En plus du cortex préfrontal ventrolatéral, d'autres activations significatives à un seuil corrigé sont ressorties de l'interaction ou de contrastes simples, listées dans le tableau 4.6 au chapitre précédent. Comme pour le cortex préfrontal ventrolatéral, deux autres régions sont significativement plus activées dans le groupe expérimental en condition contre-intuitive : le noyau caudé droit et le gyrus fusiforme droit.

Le noyau caudé est une région sous-corticale fonctionnellement connectée à des régions corticales, formant des réseaux impliqués dans le traitement cognitif et émotionnel (Graff-Radford *et al.*, 2017). Bien qu'il fasse partie du striatum, structure impliquée dans le système de récompense du cerveau, on associe également le noyau caudé à la planification d'actions dirigées vers un but,

comme la sélection d'une réponse (Grahn *et al.*, 2008) et le contrôle d'interférences, notamment lors de tâches classiques de contrôle inhibiteur (Cai *et al.*, 2014; Sebastian *et al.*, 2013), comme la tâche *Go/No-go* (Rubia *et al.*, 2006) ou celle de *Stroop* (Peterson *et al.*, 2002). En plus du cortex préfrontal ventrolatéral et d'autres régions corticales, le noyau caudé et d'autres régions sous-corticales contribuent en effet aux réseaux associés au contrôle inhibiteur, bien que leur rôle soit moins documenté. Par exemple, une étude en IRMf publiée dans la collection de revues *Nature* montre que l'activation du noyau caudé augmente à mesure que le contrôle inhibiteur devient plus efficace, dans le contexte de la tâche *Simon*, dans laquelle on retrouve des items intuitifs et contre-intuitifs en lien avec des formes, leur couleur et leur position dans l'espace, réputée pour nécessiter le contrôle inhibiteur (Schmidt *et al.*, 2020). D'autres études précisent que la participation du noyau caudé à un réseau fonctionnel plus large associé au contrôle inhibiteur serait en partie reliée à l'anticipation d'un signal d'arrêt (Pas *et al.*, 2017; Vink *et al.*, 2015) et à la préparation subséquente de la mise en place du contrôle inhibiteur (Majid *et al.*, 2013; Smittenaar *et al.*, 2013). Cela suggère que l'activation du noyau caudé observée dans la condition contre-intuitive chez les participants du groupe expérimental de la présente recherche pourrait refléter une anticipation du besoin d'inhiber un automatisme dans cette condition et une préparation à le faire. Bien que cette interprétation soit une piste intéressante, il reste nécessaire d'être prudent en ce sens puisque ce résultat apparaît à un seuil non corrigé et que la taille du cluster est très petite.

Le gyrus fusiforme, quant à lui, est une extension des aires visuelles et occupe donc des fonctions visuelles complexes, comme la reconnaissance des visages ou d'objets (Bernal et Perdomo, 2008). Il est notamment aussi activé lorsqu'on s'imagine écrire ou dessiner, et est donc également impliqué dans l'imagination d'éléments visuels (Harrington *et al.*, 2007). Son activation a aussi été associée à une attention soutenue aux formes et aux couleurs présentées (Le *et al.*, 1998) ainsi qu'aux éléments visuels non symboliques (nuages de points) lors d'une tâche de comparaison de nombres (Wilkey et Price, 2019). Dans la présente étude, cela suggère que les participants du groupe expérimental avaient possiblement tendance à porter davantage leur attention sur les éléments visuels des stimuli dans la condition contre-intuitive, et peut-être même sur la représentation imaginée des fractions sous forme de cercles divisés en parties. Comme il était erroné de s'appuyer sur l'automatisme dans la condition contre-intuitive, il est effectivement

possible que les participants aient plutôt tenté d'imaginer les fractions sous forme de cercles portionnés, de la même façon que les rétroactions fournies les présentaient tout au long de la tâche.

Les autres activations significatives observées se retrouvent en condition intuitive dans le groupe contrôle, soit le putamen gauche et les cortex visuels associatifs gauche et droit. On associe généralement le putamen à des fonctions cognitives de moins haut niveau, c'est-à-dire à des apprentissages qui nécessitent moins d'attention ou d'énergie cognitive et qui sont plus habituels ou automatiques (Grahn *et al.*, 2008; Ell *et al.*, 2011). La littérature l'associe également au système de récompense et de renforcement du cerveau (DePasque Swanson et Tricomi, 2014; Ell *et al.*, 2011). Il est par exemple activé lors de l'anticipation d'une récompense, son activité étant corrélée à l'amplitude de la récompense (Ell *et al.*, 2011), ou lors d'une rétroaction positive (DePasque Swanson et Tricomi, 2014). En effet, anticiper une récompense ou recevoir une rétroaction positive agit comme renforcement positif en procurant un sentiment de plaisir et de satisfaction qui motive à reproduire le même comportement ultérieurement (Masson, 2020). L'activité du putamen peut aussi refléter le niveau de confiance concernant une décision prise (Ell *et al.*, 2011), probablement parce que le fait d'être confiant en sa prédiction entraîne l'anticipation d'une récompense. Dans la présente recherche, l'activation du putamen chez les participants du groupe contrôle dans la condition intuitive suggère donc qu'ils arrivaient à répondre à ces items plutôt facilement (ce que les taux de réussite confirment) et de façon relativement automatique, ayant confiance en leur réponse et anticipant une rétroaction positive. Enfin, la plus grande activation des cortex visuels associatifs gauche et droit dans le groupe contrôle lors des items intuitifs suggère que les participants de ce groupe traitaient l'information de façon plus visuelle qu'analytique, possiblement en comparant simplement les numérateurs des fractions, ce qui menait à la bonne réponse dans cette condition. Encore une fois, il faut rester prudent quant à l'interprétation de l'activation du cortex visuel associatif droit, en raison du seuil non corrigé et de la petite taille du cluster.

Pour résumer, il semble donc que les participants des deux groupes réalisent un travail cérébral partiellement différent lorsqu'ils comparent des fractions. En effet, les résultats cérébraux significatifs à un seuil corrigé suggèrent que les élèves ayant visionné la vidéo sur la neuroplasticité activent davantage que les élèves du groupe contrôle des régions associées au contrôle inhibiteur (cortex préfrontal ventrolatéral et noyau caudé) dans la condition contre-intuitive, soit celle

nécessitant du contrôle inhibiteur, alors que ceux du groupe contrôle semblent traiter l'information de façon plus visuelle dans la condition intuitive. Ces derniers semblent également plus centrés sur le sentiment de récompense que leur procure l'anticipation de réussite aux items intuitifs (« faciles »), alors que les élèves du groupe expérimental semblent accorder davantage de ressources attentionnelles aux items contre-intuitifs et se préparer à la mise en place du contrôle inhibiteur dans le but d'éviter de tomber dans le « piège » de l'automatisme.

Toutefois, la deuxième partie de l'hypothèse 2 concernant le contrôle inhibiteur prédisait des temps de réponse plus longs dans le groupe expérimental pour les items contre-intuitifs, reflétant la mise en place du contrôle inhibiteur, ce qui n'a pas été observé. En effet, bien que les temps de réponse pour la condition contre-intuitive aient été significativement plus longs que ceux pour la condition intuitive dans les deux groupes (reflétant le probable besoin de mobiliser le contrôle inhibiteur dans cette condition), aucune différence significative entre les groupes n'a été notée. Cela laisse entendre que les participants du groupe expérimental n'ont peut-être pas réussi davantage que ceux du groupe contrôle à mener à terme leur mobilisation du contrôle inhibiteur dans la condition contre-intuitive. Les résultats relatifs aux taux de réussite sont cohérents avec cette hypothèse, n'étant pas significativement plus élevés dans le groupe expérimental que dans le groupe contrôle pour la condition contre-intuitive. Cela mène à penser que, bien que les participants du groupe expérimental mobilisent davantage que ceux du groupe contrôle des régions cérébrales liées au contrôle inhibiteur dans la condition contre-intuitive, cela ne semble pas avoir été suffisant pour les mener à la mise en place complète du contrôle inhibiteur, qui aurait été reflétée par des temps de réponse plus longs et des taux de réussite plus élevés dans cette condition, comparativement aux participants du groupe contrôle.

L'hypothèse selon laquelle l'enseignement du concept de neuroplasticité mènerait à une plus grande mobilisation du contrôle inhibiteur dans le groupe expérimental est donc partiellement appuyée. L'activité cérébrale des participants suggère que ceux ayant visionné la vidéo sur la neuroplasticité ont initié, davantage que les participants du groupe contrôle, la mobilisation du contrôle inhibiteur : ils semblent avoir porté davantage d'attention aux éléments pertinents dans la condition contre-intuitive et enclenché davantage les mécanismes liés au contrôle inhibiteur. Toutefois, ils ne semblent pas être arrivés à compléter la mise en place du contrôle inhibiteur davantage que les participants du groupe contrôle, car aucun indice d'une plus grande mobilisation

du contrôle inhibiteur pour ces participants ne se retrouve dans les données comportementales (temps de réponse et taux de réussite). Il est possible que la vidéo expérimentale n'ait pas été suffisante, en raison notamment de sa courte durée ou du fait qu'elle intégrait plusieurs idées en peu de temps, pour avoir entraîné des effets observables au niveau comportemental, bien qu'il semble y avoir eu un effet sur la motivation et l'activité cérébrale. Par ailleurs, bien que la différence entre les groupes pour les temps de réponse ne soit pas significative, on remarque que les temps de réponse aux items intuitifs sont plus longs dans le groupe expérimental que dans le groupe contrôle. On peut alors se demander si cette différence descriptive peut représenter un indice d'un niveau de performance plus faible des élèves du groupe expérimental à la base, sans que cette différence n'atteigne le seuil de significativité. Théoriquement, le fait que les participants aient été répartis aléatoirement dans chacun des groupes permet de présumer que les groupes ne diffèrent pas au départ. Cependant, plus l'échantillon est grand, plus cela est vrai (Macnamara *et al.*, 2023). Il est donc aussi possible que le hasard ait fait en sorte que l'un des groupes soit légèrement plus faible que l'autre dans la présente recherche, étant donné que les groupes n'étaient constitués que de 22 participants chacun. L'absence de prétest pour la tâche de comparaison de fractions (dans le but d'éviter un apprentissage dans cette tâche) ne nous permet toutefois pas de vérifier cette hypothèse. Concernant cette légère différence liée aux temps de réponse plus longs aux items intuitifs dans le groupe expérimental, il est aussi possible que l'intervention ait mené les participants à hésiter et à faire davantage attention à leur façon de répondre dans toute la tâche, entraînant des temps de réponse plus longs dans ce groupe pour tous les items.

5.1.3 Hypothèse 3 : effets d'un enseignement de la neuroplasticité sur la performance à la tâche de comparaison de fractions

Enfin, l'hypothèse concernant la performance prédisait un taux de réussite plus élevé à la tâche de comparaison de fractions dans le groupe expérimental, comparativement au groupe contrôle, *à la suite d'une mobilisation du contrôle inhibiteur présumée plus grande dans ce groupe*. Or, puisqu'il semble que les participants du groupe expérimental n'aient pas complété l'inhibition de l'automatisme davantage que les participants du groupe contrôle, il est tout à fait cohérent de n'observer aucune différence entre les groupes au niveau des taux de réussite à la tâche. En effet, comme pour les temps de réponse, on observe un effet de la condition, soit un taux de réussite significativement plus faible pour les items contre-intuitifs que pour les items intuitifs dans chacun

des groupes, supportant l'idée du besoin de contrôle inhibiteur dans cette première condition. Aucune différence significative n'est toutefois notée entre les groupes, appuyant l'interprétation proposée au sujet du contrôle inhibiteur, soit que les participants du groupe expérimental n'ont probablement pas réussi, plus que le groupe contrôle, à mobiliser suffisamment le contrôle inhibiteur pour mener à sa mise en place complète et que cela puisse se refléter dans les taux de réussite.

Toutefois, de la même façon que pour les temps de réponse, on remarque, d'un point de vue strictement descriptif, que les taux de réussite aux items intuitifs sont plus faibles dans le groupe expérimental que dans le groupe contrôle, sans que cette différence ne soit significative. Comme mentionné plus haut, il est possible que l'intervention ait mené les participants du groupe expérimental à être plus prudents et à hésiter davantage dans leurs réponses (par exemple, en voulant répondre l'inverse de ce qu'ils pensent), d'où un taux d'erreurs plus élevé dans les items intuitifs. Une étude de Babai et ses collaborateurs (2015) soutient d'ailleurs cette hypothèse. Dans cette étude, une intervention visant à favoriser la mobilisation du contrôle inhibiteur avait mené à de meilleurs taux de réussite aux items contre-intuitifs, mais à une faible diminution de la performance aux items intuitifs. Par ailleurs, cette performance légèrement plus faible aux items intuitifs dans le groupe expérimental peut aussi appuyer l'hypothèse précédente selon laquelle il est possible que les participants de ce groupe aient été légèrement plus faibles que les participants du groupe contrôle au départ. Bien qu'il ne soit pas possible de vérifier cette hypothèse en raison de l'absence d'un prétest pour la tâche de comparaison de fractions, les participants du groupe expérimental ont aussi obtenu des résultats plus faibles au questionnaire de présélection en mathématiques, mais ces différences ne sont pas significatives non plus. En effet, le groupe expérimental a obtenu un taux de réussite de 80 % au questionnaire de présélection, comparativement à 84 % pour le groupe contrôle. Plus encore, si l'on ne considère que les items contre-intuitifs, et donc qui nécessitent la mobilisation du contrôle inhibiteur, on note que le groupe expérimental a performé à 66 %, comparativement à 72 % pour le groupe contrôle, sans que cette différence ne soit significative. L'absence de différences significatives pour le questionnaire de présélection, peut-être due à un manque de puissance statistique, ne nous permet pas d'affirmer que les groupes étaient différents au départ, mais il existe tout de même une possibilité que le groupe expérimental ait été légèrement défavorisé, ayant peut-être des compétences plus faibles à

la base. Cela pourrait donc peut-être contribuer à expliquer pourquoi les participants de ce groupe n'ont pas démontré une plus grande mobilisation du contrôle inhibiteur dans les temps de réponse et dans les taux de réussite à la tâche de comparaison de fractions. De façon intéressante, on observe aussi que les taux de réussite aux items contre-intuitifs sont tout de même légèrement plus élevés dans le groupe expérimental que dans le groupe contrôle. Ainsi, le fait que le groupe expérimental soit légèrement plus faible aux items intuitifs et légèrement plus fort aux items contre-intuitifs est cohérent avec les hypothèses liées au contrôle inhibiteur et à la performance, bien qu'il ne permette pas de les confirmer. Puis, les résultats au questionnaire motivationnel permettent également d'observer que le groupe expérimental semblait initialement moins motivé que le groupe contrôle au prétest, bien que cette différence n'atteigne pas le seuil de significativité ($p = 0,09$), ce qui appuie encore une fois l'hypothèse selon laquelle le groupe expérimental était peut-être légèrement désavantagé au départ. Comme pour les temps de réponse, il est finalement aussi possible que les effets de la vidéo n'aient pas été suffisants pour se répercuter sur les taux de réussite.

Ces résultats permettent aussi de fournir une nouvelle explication potentielle concernant les résultats souvent contradictoires quant à l'effet des interventions de type « état d'esprit » sur la réussite. En effet, ils montrent qu'il est possible que ce type d'intervention ait des effets positifs sur l'activité cérébrale, mais que ces effets soient encore insuffisants pour se répercuter sur les résultats comportementaux liés à la performance. Toutefois, tel que mentionné plus tôt, il est possible de penser qu'un apprentissage en progression observé en neuroimagerie puisse éventuellement se consolider suffisamment pour être observé au niveau comportemental. Comme la majorité des études n'ont pas de mesures de neuroimagerie, on risque peut-être de négliger les effets au niveau cérébral qui modulent les effets au niveau comportemental. Des études peuvent donc parfois conclure que l'intervention n'a pas eu d'effet, alors qu'elle a peut-être eu des effets au niveau cérébral, ce qui constitue un pas dans la bonne direction.

5.1.4 Relation entre la motivation et la mobilisation du contrôle inhibiteur

Par ailleurs, sans en avoir fait une hypothèse en tant que telle, cette recherche cherchait également au départ à vérifier si la motivation agit comme une variable modératrice dans la relation entre l'enseignement de la neuroplasticité et la mobilisation du contrôle inhibiteur. En d'autres mots, comme plusieurs recherches attribuent les effets d'un enseignement de la neuroplasticité sur les

comportements orientés vers un but (p. ex., mobilisation du contrôle inhibiteur, attention, effort, etc.) à un changement d'état d'esprit (croyances motivationnelles), la présente recherche a tenté de vérifier l'existence de cette relation entre le changement dans la motivation et la mobilisation du contrôle inhibiteur à l'aide d'une analyse de prédiction.

Une régression linéaire a été effectuée afin de vérifier, parmi les quatre variables motivationnelles, celles qui prédisaient l'activité cérébrale liée au contrôle inhibiteur. Seul le changement dans la perception de compétence à la suite de l'intervention a été lié significativement à l'activation du cortex préfrontal ventrolatéral, les autres variables ne présentant pas de lien significatif avec l'activité cérébrale. En effet, le coefficient de corrélation global pour la régression obtenue ($r = 0,319$) est de taille moyenne et est significatif ($p = 0,035$), expliquant 10,2 % de la variance. Cela signifie que le changement dans la perception de compétence prédit partiellement, mais significativement, l'activité cérébrale liée au contrôle inhibiteur. En effet, bien que l'enseignement de la neuroplasticité semble avoir influencé positivement la perception de contrôle, la perception de l'erreur et la perception de compétence, seule cette dernière variable semble liée à un changement dans l'activité cérébrale. Ainsi, un enseignement de la neuroplasticité mènerait les élèves à se percevoir notamment comme plus compétents, et c'est ce changement dans leur perception qui les mènerait peut-être à faire plus d'effort cognitif et à porter davantage attention aux éléments pertinents en condition contre-intuitive, en activant plus fortement leur cortex préfrontal ventrolatéral. Il est intéressant de noter que c'est le changement dans la perception de compétence des participants entre le prétest et le posttest qui est lié à une plus grande activité cérébrale liée au contrôle inhibiteur, ce qui laisse entendre que cette plus grande activité cérébrale n'est pas due à une perception de compétence déjà élevée au départ. Évidemment, il est impératif de considérer ces interprétations avec prudence; il faudra assurément que des recherches ultérieures reproduisent ces résultats. Néanmoins, plusieurs recherches ont déjà mis en évidence que la perception de compétence semblait liée, plus que l'état d'esprit, aux variables sur lesquelles l'état d'esprit est présumé avoir un impact, comme les buts d'apprentissage (contrairement aux buts de performance) (Chen et Pajares, 2010; Burgoyne *et al.*, 2020), les comportements orientés vers un but (Dupeyrat et Mariné, 2004; Kennett et Keefer, 2006) et la performance (Chen et Pajares, 2010; Dupeyrat et Mariné, 2004; Kennett et Keefer, 2006).

Les résultats de la présente recherche apportent ainsi plusieurs pistes de réflexion. La théorie de l'état d'esprit (Dweck, 2000, 2006) a souvent été évoquée pour expliquer le lien entre un enseignement de la neuroplasticité, les comportements orientés vers un but et la réussite, mais plusieurs résultats contradictoires ne cessent d'émerger. La présente recherche avait donc notamment pour objectif de tenter d'éclaircir ce lien, en distinguant quatre variables motivationnelles régulièrement présentes dans les questionnaires portant sur l'état d'esprit, faisant l'hypothèse que certaines d'entre elles prédisaient peut-être davantage que d'autres les effets sur la mobilisation du contrôle inhibiteur (et ultimement la performance). En cohérence avec plusieurs études, il semble que la perception de compétence soit la variable ayant le plus d'impact, contrairement à la perception de la malléabilité des habiletés, la perception de contrôle et la perception de l'erreur. Ainsi, ce seraient peut-être plus spécifiquement les interventions qui permettent d'augmenter la perception de compétence chez l'élève qui entraîneraient des effets positifs. Paradoxalement, le cœur de la théorie de l'état d'esprit repose davantage sur la croyance selon laquelle il est possible de s'améliorer, plutôt que sur le fait de croire qu'on est compétent.

Les présents résultats appuient donc une explication provisoire mais relativement documentée concernant les résultats mitigés en lien avec la théorie de l'état d'esprit, soit celle selon laquelle l'une des variables modératrices entre une intervention visant à induire un état d'esprit dynamique et différentes variables associées à la réussite serait plus spécifiquement celle de la perception de compétence. Bien que l'intervention dans la présente recherche ait également eu un effet positif et significatif sur la perception de contrôle et la perception de l'erreur, ces variables, ainsi que la perception de la malléabilité des habiletés, feraient alors peut-être plutôt partie des variables confondantes qui induisent de la variance inexplicée dans les résultats de recherche visant à évaluer les effets sur les comportements orientés vers un but et les résultats scolaires. La perception de compétence pourrait peut-être même constituer la variable principale produisant un effet, c'est-à-dire constituer une variable médiatrice (expliquant *comment* ou *pourquoi* l'effet se produit) plutôt que modératrice (spécifiant *quand* l'effet se produit) (Baron et Kenny, 1986), et les interventions de type *état d'esprit* ne seraient peut-être qu'une façon parmi d'autres d'influencer la perception de compétence.

5.2 Implications pédagogiques

Les résultats de la présente recherche sont importants, car ils suggèrent que l'enseignement du concept de neuroplasticité offert aux participants du groupe expérimental aurait permis d'améliorer leur motivation (perception de contrôle, perception de l'erreur et perception de compétence) et leur activité cérébrale liée au contrôle inhibiteur de façon significative, comparativement aux participants du groupe contrôle. Ces effets sur la motivation sont déjà intéressants en soi. En effet, il ne semble pas nécessaire de déployer de longues et coûteuses ressources pédagogiques pour induire chez les élèves un sentiment de contrôle sur leur apprentissage et une vision plus positive de l'erreur, en plus de leur permettre de se sentir plus compétents. On peut penser que ces effets soient bénéfiques, par exemple en ce qui a trait à l'anxiété (Bandura, 1988) que ressentent certains élèves ou au bien-être de façon plus générale (Deci et Ryan, 2000; Reeve, 2018). Les effets observés sur la perception de compétence permettent toutefois d'aller plus loin : l'enseignement de la neuroplasticité permettrait aux élèves de se sentir plus compétents, davantage en mesure de réaliser les tâches proposées, et ce changement dans leur perception les inciterait à activer davantage des régions cérébrales liées à l'attention et au contrôle inhibiteur.

Ainsi, comme mentionné précédemment, les interventions visant à induire un état d'esprit dynamique ont peut-être parfois des impacts positifs non pas parce qu'elles permettent d'induire un état d'esprit dynamique (ce qui n'est d'ailleurs pas toujours le cas), mais plus particulièrement parce qu'elles permettent d'augmenter la perception de compétence des élèves. En effet, ces interventions incluent régulièrement plus que la notion de plasticité cérébrale seule, en ajoutant des encouragements vis-à-vis diverses stratégies : pratiquer, faire des efforts, porter attention aux erreurs, etc. Dans la présente recherche, nous avons d'ailleurs mis l'accent sur ces stratégies, en plus d'inclure un segment visant à convaincre l'élève qu'il est capable de réussir les tâches qu'on lui propose, segment visant directement à influencer la perception de compétence. Les chercheurs et professionnels de l'éducation auraient donc probablement avantage à inclure dans leurs interventions non seulement la notion de neuroplasticité, mais également l'encouragement à des stratégies pertinentes, et peut-être *surtout* des éléments permettant de les convaincre qu'ils sont capables de réaliser les tâches proposées.

Bien sûr, les effets de l'enseignement de la neuroplasticité dans cette recherche sur la mobilisation du contrôle inhibiteur spécifiquement semblent limités, considérant qu'ils n'ont pas été suffisants pour être observés au niveau comportemental. Cela dit, il s'agit d'un pas dans la bonne direction : le visionnement d'une simple vidéo d'à peine 5 minutes pourrait être suffisant pour modifier l'activité cérébrale des élèves, en les incitant à mobiliser davantage des régions importantes dans l'attention et le contrôle inhibiteur. Cela appuie d'ailleurs la littérature grandissante selon laquelle les enseignants, par les choix pédagogiques qu'ils font, peuvent influencer le fonctionnement cérébral de leurs élèves (Brault Foisy *et al.*, 2020; Masson et Brault Foisy, 2014). Ce résultat sur la mobilisation du contrôle inhibiteur est donc en réalité substantiel, considérant que les recherches visant à évaluer les impacts d'entraînements au contrôle inhibiteur de façon générale (*domain-general*) ont montré peu d'espoir, le transfert se faisant difficilement (Wilkinson *et al.*, 2020). En effet, il semble davantage possible d'améliorer les capacités liées au contrôle inhibiteur dans une tâche spécifique (*domain-specific*), que de les améliorer de façon transversale (Wilkinson *et al.*, 2020). Or, l'intervention visant à favoriser la mobilisation du contrôle inhibiteur dans la présente recherche est une intervention de nature plutôt générale, en ce sens qu'elle ne visait pas une tâche spécifique, et semble tout de même avoir eu des effets positifs sur la mobilisation du contrôle inhibiteur, bien que modestes. Il s'agit donc d'un résultat d'importance, considérant toutes les recherches qui mettent en évidence le rôle fondamental du contrôle inhibiteur dans l'apprentissage des mathématiques en particulier (Gilmore *et al.*, 2013; Gómez *et al.*, 2015; St Clair-Thompson et Gathercole, 2006; Gómez *et al.*, 2015; Rossi *et al.*, 2019, Roell *et al.*, 2017) et dans le développement et l'apprentissage en général (Diamond 2013; Houdé, 2004; Houdé *et al.*, 2000; Houdé et Borst, 2015; Houdé et Leroux, 2009; van den Wildenberg et van der Molen, 2004; Ward, 2010). Ce résultat est d'autant plus notable considérant toutes les limites inhérentes au projet, qui seront présentées à la section suivante. Il n'est évidemment pas possible de transposer ces résultats directement à la salle de classe, mais on peut penser que le visionnement en classe de la vidéo créée dans le cadre du présent projet (d'ailleurs disponible en accès libre au <http://www.labneuroeducation.org/cerveau>) aurait possiblement des effets semblables sur la motivation et la mobilisation du contrôle inhibiteur chez les élèves. Qui plus est, en contexte de classe, un enseignant peut décider de présenter la vidéo, mais également de l'arrêter après un segment pour en discuter plus en profondeur avec ses élèves. Ces derniers peuvent par exemple être invités à présenter des anecdotes en lien avec leurs propres expériences de réussite. La vidéo

peut ensuite être visionnée à nouveau dans l'année afin d'offrir une occasion de répétition et donc permettre de renforcer les réseaux de neurones associés aux notions présentées, la notion d'apprentissage étant indissociable de la notion de répétition (Riopel et McMullin, 2021). Rappelons d'ailleurs que dans le cadre du présent projet, la vidéo a été visionnée deux fois de suite afin de favoriser ce renforcement des réseaux neuronaux et donc, l'apprentissage. Par ailleurs, même en dehors de la présentation de la vidéo, l'enseignant peut continuer de renforcer ces notions dans son enseignement, sans que cela ne représente une charge de travail significative. En effet, il est possible de fournir aux élèves de courts commentaires quotidiens à l'effet que leurs connexions neuronales se renforcent lorsqu'ils pratiquent tel ou tel exercice, lorsqu'ils portent attention, s'appliquent et fournissent des efforts, et lorsqu'ils croient en leurs capacités. D'ailleurs, de plus en plus de recherches mettent en évidence que les interventions visant à induire un état d'esprit dynamique sont plus efficaces lorsque le climat de la classe est cohérent avec cette idéologie et la supporte, notamment lorsque l'enseignant fournit des rétroactions compatibles avec cet état d'esprit (Gunderson *et al.*, 2013; Walton et Yeager, 2020; Yeager *et al.*, 2022). Les effets d'un tel enseignement pourraient donc même être encore plus avantageux en salle de classe, d'autant plus que plusieurs recherches soutiennent que les interventions visant l'amélioration des fonctions exécutives sont plus susceptibles d'être efficaces dans le contexte dans lequel elles doivent être appliquées, plutôt qu'en laboratoire (Wilkinson *et al.*, 2020). Cela rejoint l'idée mentionnée précédemment selon laquelle les interventions de type *domain-general* sont en général moins efficaces que celles de type *domain-specific*, soit dans un contexte précis. Ainsi, un enseignant pourrait également utiliser la vidéo pour faire des liens spécifiques avec différentes tâches. Par exemple, lors de l'évocation d'une stratégie dans la vidéo, il pourrait discuter avec les élèves des façons de mettre en application cette stratégie dans le contexte de la comparaison de fractions, afin de faciliter le transfert.

Cela dit, nos résultats n'ont pas montré d'effet sur la performance des élèves à la tâche de comparaison de fractions. Comme il a été mentionné précédemment, cela n'est pas surprenant, considérant que les effets sur la mobilisation du contrôle inhibiteur sont partiels. Cela est aussi cohérent avec l'idée selon laquelle ce type d'intervention n'est pas non plus magique; si le fait de visionner une vidéo de 5 minutes n'étant pas directement reliée à l'apprentissage des mathématiques augmentait drastiquement et instantanément la performance à une tâche de

comparaison de fractions, il s'agirait d'un résultat plutôt phénoménal. La réalité est rarement aussi simple, d'autant plus que rien, et en particulier aucun phénomène psychologique, ne fonctionne de la même manière pour tous les individus et dans tous les contextes (Yeager *et al.*, 2022). Afin de choisir les pratiques éducatives les plus avantageuses, il s'agit donc d'évaluer leur rapport coûts-bénéfices. Une intervention ayant un fort impact mérite qu'on lui consacre une quantité plus importante de ressources, que ce soit en temps, en énergie ou en argent. Si une intervention a un impact plus faible, mais somme toute positif, on peut se demander si les ressources qui y seront consenties sont raisonnables. Dans le cas d'une intervention courte et peu coûteuse comme celle étudiée dans la présente recherche, les coûts apparaissent judicieux, compte tenu des bénéfices potentiels.

Ainsi, il semble qu'il soit intéressant d'offrir aux élèves un enseignement de la neuroplasticité qui soit court et simple, mais peut-être à condition qu'il permette d'influencer la perception de compétence des élèves. La perception de compétence fait référence au fait de se sentir capable de réaliser les tâches proposées. Tel que mentionné au chapitre II, ce qui détermine la motivation d'un élève à s'engager dans une tâche, à fournir les efforts nécessaires et à adopter des comportements orientés vers un but semble fortement lié à l'analyse coûts-bénéfices que son cerveau fait de la situation (Kramer *et al.*, 2020). En effet, il analyse si les bénéfices associés au fait de réussir la tâche valent les coûts qu'il devra investir (par exemple, les efforts requis). Toutefois, encore faut-il qu'il ait confiance qu'il réussira effectivement la tâche (et donc une bonne perception de sa compétence). Moins il en est certain, moins il osera s'investir. Ainsi, en amont de l'analyse coûts-bénéfices, il semble crucial que l'élève se sente d'abord capable de réussir la tâche, sans quoi toute tentative lui semblera sans doute vaine. Les résultats de la présente recherche appuient donc en partie le modèle motivationnel élaboré et présenté au chapitre II (voir figure 2.2), sans évidemment pouvoir le confirmer entièrement. En effet, c'est la perception de compétence qui semble la variable la plus directement liée à l'analyse coûts/bénéfices que fait l'élève et aux comportements orientés vers un but qu'il met en place. La perception de la malléabilité des habiletés, de contrôle et de l'erreur ont peut-être un certain rôle dans l'interaction des croyances motivationnelles puisqu'elles sont liées, mais influencent probablement moins directement l'analyse coûts/bénéfices et les comportements orientés vers un but que la perception de compétence. La figure 5.2 reprend les concepts du modèle motivationnel présenté au chapitre II, en mettant toutefois en évidence les

relations appuyées par les résultats de la présente recherche. On observe d'abord que l'intervention au sujet de la neuroplasticité a eu un impact significatif sur la perception de contrôle, la perception de l'erreur et la perception de compétence (indiqué par les flèches pleines), mais pas sur la perception de la malléabilité des habiletés (flèche pointillée). On note par la suite que seule la perception de compétence a eu un impact significatif sur l'activité cérébrale liée au contrôle inhibiteur (probablement par le biais d'une analyse coûts/bénéfices), mais que les effets n'ont peut-être pas été suffisants pour se répercuter sur les temps de réponse ainsi que sur la performance à la tâche de comparaison de fractions. Les flèches grises indiquent les relations présumées qui n'ont pas été testées dans la présente recherche.

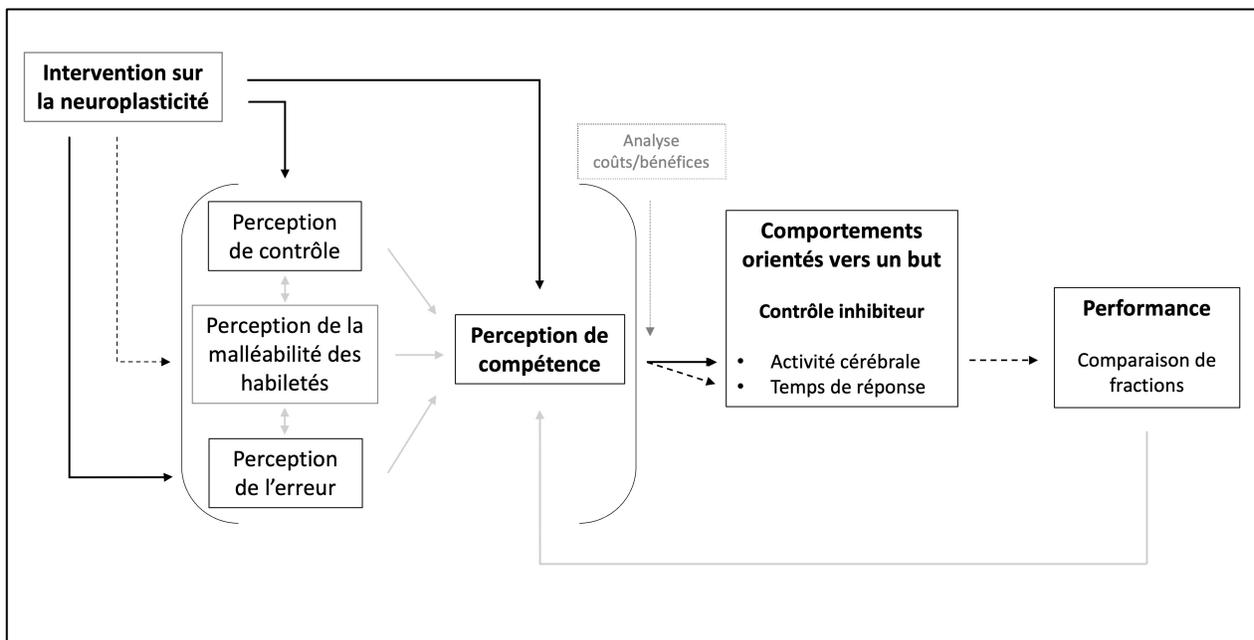


Figure 5.2 Modèle illustrant les relations appuyées par les résultats de la présente recherche.

Il semble donc qu'il soit plus avantageux de consacrer de l'énergie et des ressources pédagogiques, même modestes, à favoriser la perception de compétence des élèves, plutôt que de se concentrer simplement sur la perception de la malléabilité des habiletés, soit le cœur de la théorie de l'état d'esprit, ou les perceptions de contrôle et de l'erreur. On peut alors tenter d'identifier d'autres façons d'influencer plus spécifiquement la perception de compétence, sans que cela ne nécessite des ressources considérables. Mis à part une intervention visant à enseigner le concept de neuroplasticité incluant des encouragements à croire qu'on est capable de réussir, d'autres

pratiques pédagogiques sont susceptibles de favoriser la perception de compétence chez les élèves. En effet, la principale source permettant d'influencer la perception de compétence serait l'expérience personnelle (Bandura, 2001; Reeve, 2018). Autrement dit, l'élève évalue sa propre compétence dans un contexte en se référant principalement à des expériences similaires qu'il a vécues. Si son expérience lui montre qu'il a réussi dans la majorité des situations semblables, la perception de sa compétence sera plus élevée que si les situations semblables vécues ont été échouées. D'ailleurs, des chercheurs soutiennent que la réussite aurait davantage d'impact sur la motivation (notamment la perception de compétence) que la motivation sur la réussite (Garon-Carrier *et al.*, 2016), bien que les deux relations semblent exister (Reeve, 2018). Ainsi, l'une des pistes les plus intéressantes pour favoriser la motivation et plus spécifiquement la perception de compétence chez les élèves serait de leur faire vivre des réussites. Pour placer les élèves en situation de réussite, il faut alors leur proposer des tâches présentant un défi adapté à leur niveau de compétence. La littérature à ce sujet n'est pas récente : on peut simplement penser à la zone proximale de développement suggérée par Vygotski dès 1934 (Raby et Viola, 2022), ou encore à la notion de *défi optimal* ou de *flow* dans un cadre plus motivationnel (Reeve, 2018). L'idée derrière ces concepts est simple : proposer aux élèves des tâches représentant un défi trop grand pour leur niveau de compétence risque notamment de provoquer chez eux de l'anxiété, de l'impuissance (Nieuwenhuis *et al.*, 2023; Reeve, 2018) et une surcharge cognitive, c'est-à-dire un état dans lequel la mémoire de travail n'arrive plus à traiter l'information (Masson, 2020). À l'inverse, proposer des défis trop faciles pour le niveau de compétence des élèves leur permet de faire peu d'apprentissage, en plus de les ennuyer et de miner leur motivation (Reeve, 2018). Il s'agit donc de trouver cet équilibre dans les tâches proposées aux élèves afin que le défi proposé soit raisonnable et se situe dans la zone désirable : ni trop facile, ni trop difficile. Ainsi, favoriser la proposition de tâches présentant des défis adaptés au niveau de compétence des élèves permettrait de leur faire vivre des réussites qui influenceraient la perception de leur compétence, qui à son tour favoriserait l'adoption de comportements orientés vers un but, contribuant également à la réussite. Dans la figure 5.2, cela est représenté par la flèche partant de la performance et allant jusqu'à la perception de compétence. Ainsi, faire vivre des réussites aux élèves est l'une des façons qui permettraient d'influencer la perception de compétence, mais d'autres chercheurs pourraient également œuvrer à identifier d'autres moyens, courts et simples, pour le faire.

5.3 Limites de la recherche

En dépit de tous les efforts consentis à la minimisation des limites conceptuelles et méthodologiques dans la présente recherche, celle-ci en comporte tout de même certaines, notamment en raison de la nécessité de composer avec une série de contraintes logistiques, qui doivent être considérées dans l'interprétation des résultats.

La principale limite concerne probablement l'échantillon recruté. Au départ, il était prévu recruter des élèves ayant un taux de réussite plutôt faible aux items de comparaison de fractions dans le questionnaire de présélection, en plus de présenter un état d'esprit fixe, ou des croyances motivationnelles faibles. Or, il n'a pas été possible de recruter des participants satisfaisant à ces critères; nous avons donc dû les assouplir. Cela a fait en sorte que les participants à la recherche étaient donc initialement assez motivés (ayant notamment un état d'esprit plutôt dynamique) et compétents en comparaison de fractions, ce qui a mené à un effet plafond non négligeable à la fois dans le questionnaire motivationnel et dans la tâche de comparaison de fractions. Ne laissant que peu de place à l'amélioration, il est possible que les résultats aient été limités en raison de cet effet.

La taille modeste de l'échantillon (22 participants par groupe) fait également partie des limites de la recherche, d'abord parce qu'elle limite la puissance statistique. Puis, malgré une répartition aléatoire des participants dans chacun des groupes, cette petite taille d'échantillon a pu permettre au hasard de créer des groupes n'étant pas équivalents sur le plan de différents facteurs, comme les capacités intellectuelles, d'attention ou de mobilisation du contrôle inhibiteur. Afin de vérifier l'équivalence des groupes quant à ces variables, il aurait été nécessaire d'effectuer un prétest pour chacune d'entre elles. Ces variables confondantes ne permettent donc pas d'affirmer avec certitude que les différences observées sont attribuables à l'intervention. Néanmoins, comme il a été mentionné plus tôt, il est aussi possible que les groupes n'aient pas été équivalents au niveau de la motivation et des habiletés en comparaison de fractions, en défaveur du groupe expérimental. Bien que les données obtenues ne montrent pas de différences significatives entre les groupes, on observe tout de même que le groupe expérimental est qualitativement moins motivé au départ et plus faible au questionnaire de présélection en mathématiques et aux items intuitifs à la tâche de comparaison de fractions. Cela laisse entendre que si les groupes n'étaient pas équivalents, ce serait probablement le groupe expérimental qui aurait été désavantagé. Or, le fait qu'on observe des effets

positifs de l'intervention malgré cela est particulièrement intéressant. Finalement, le fait que les participants aient été recrutés sur une base volontaire limite sa représentativité de la population de laquelle il est issu. Les enfants (et/ou leurs parents) se manifestant possèdent possiblement des caractéristiques différentes de ceux ne s'étant pas manifesté, comme la témérité, la confiance ou un intérêt pour les mathématiques. Toutefois, ces caractéristiques seraient présentes dans les deux groupes, ce qui diminue la probabilité que les différences observées soient attribuables à ces facteurs.

L'âge des participants peut également avoir représenté une limite en ce qui a trait aux résultats relatifs au contrôle inhibiteur. En effet, des auteurs ont mis en évidence dans l'une des revues *Nature* qu'il n'est pas rare d'observer de faibles résultats de neuroimagerie lorsqu'on tente de mesurer le contrôle inhibiteur chez des enfants (Cai *et al.*, 2019). Comme la formation des réseaux neuronaux liés au contrôle inhibiteur se développe plus tardivement (des réseaux semblables à celui de l'adulte se développent davantage vers la fin de l'enfance, jusqu'à la fin de la vingtaine [Cai *et al.*, 2019]), il est effectivement possible que cela contribue à expliquer le manque de puissance statistique de nos résultats cérébraux auprès de notre échantillon d'enfants de 10-12 ans.

D'autres limites concernent ensuite les interventions utilisées. D'abord, la vidéo expérimentale a été conçue pour la présente recherche et a donc été testée pour la première fois. Par ailleurs, malgré les efforts afin de cibler une vidéo contrôle la plus équivalente possible (en dehors des éléments centraux à l'intervention expérimentale), d'autres différences sont présentes entre les deux vidéos, qui ont pu engendrer une variabilité non désirée. Par exemple, la vidéo expérimentale aborde le cerveau de l'élève, ce qui le concerne directement et personnellement, alors que la vidéo contrôle aborde de façon plus générale le réchauffement climatique, qui ne concerne pas directement sa personne. Il aurait été plus approprié que la vidéo contrôle concerne plus directement l'élève, sans toutefois inclure des éléments pouvant influencer ses perceptions de la malléabilité de ses habiletés, de son contrôle, de ses erreurs et de sa compétence. La vidéo contrôle aborde d'ailleurs aussi le rôle que l'élève peut jouer dans la lutte aux changements climatiques, l'encourageant à prendre conscience de son pouvoir dans la situation. Comme cet élément est également présent dans la vidéo expérimentale, dans laquelle on encourage l'élève à prendre conscience de son contrôle dans ses apprentissages, il est possible que l'effet de cette variable ait également été présent dans le groupe contrôle, réduisant l'effet observé dans le groupe expérimental. En raison des contraintes

méthodologiques auxquelles nous étions soumis, le choix de cette vidéo comme intervention contrôle a tout de même été fait. En effet, il n'était pas évident de trouver une vidéo déjà existante (afin d'éviter des frais de création élevés) s'adressant à des élèves du même âge, d'une durée et d'un style équivalents, dont le thème n'interférait pas avec le thème de la vidéo expérimentale. Finalement, l'intervention expérimentale était courte (5 minutes) et plutôt passive; les élèves devaient principalement écouter la vidéo, bien qu'elle ait été visionnée deux fois de suite et qu'on leur ait tout de même ensuite demandé de la résumer et posé trois questions de compréhension. La courte durée et le faible niveau d'interactivité ont donc assurément pu limiter la portée des effets de l'intervention.

Le questionnaire motivationnel utilisé dans cette recherche a été développé et validé dans le but de pallier les nombreuses limites inhérentes aux questionnaires d'état d'esprit utilisés dans les recherches antérieures. Malgré que de grands efforts aient été consentis à minimiser au mieux ces limites, ce nouveau questionnaire comporte inévitablement certaines limites également. Bien que sa fidélité et sa validité soient plutôt bonnes, elles ne sont pas parfaites. On peut alors se demander si le questionnaire mesure véritablement ce qu'il vise à mesurer, d'autant plus qu'un fort effet plafond est observé dans les données. En effet, les élèves semblent systématiquement répondre de façon à paraître plutôt motivés ou avoir un état d'esprit plutôt dynamique. Il est possible que cela soit dû au recrutement d'élèves déjà assez motivés, comme mentionné précédemment, mais il est aussi possible que le questionnaire fasse en sorte que les élèves y répondent généralement de cette façon. D'ailleurs, cet effet plafond était également observé dans les questionnaires précédents sur l'état d'esprit. On peut alors penser à la présence d'un biais de désirabilité sociale, considérant qu'on dit souvent aux élèves qu'il faut faire des efforts ou que leurs erreurs leur permettent d'apprendre. Ce biais a peut-être même été renforcé par la vidéo expérimentale lors du posttest, ce dernier se déroulant immédiatement après l'intervention les encourageant à répondre en ce sens et en présence d'une expérimentatrice. Finalement, le questionnaire élaboré ne concerne que les croyances relatives aux mathématiques; on ne peut donc généraliser les résultats aux croyances motivationnelles relatives à d'autres domaines.

Ensuite, la tâche de comparaison de fractions, particulièrement dans le contexte d'une séance d'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle, a nécessairement entraîné différentes limites. Le fait que les réponses devaient être données dans l'appareil d'IRM nous a contraints à élaborer

une tâche comportant un choix de réponse, plutôt qu'une réponse élaborée, en plus d'être dichotomique. Comme les participants avaient donc une probabilité de $\frac{1}{2}$ d'obtenir la bonne réponse, il est possible que les résultats ne reflètent pas exactement les habiletés des participants. Qui plus est, il s'agissait d'une tâche longue et exigeante, compte tenu du nombre élevé d'items présentés en raison du contexte d'IRMf, ce qui a pu altérer l'attention et les habiletés des participants en fin de tâche. Cette façon de réaliser la tâche ne rend pas non plus compte de la complexité du concept de comparaison de fractions. En effet, la tâche visait à isoler au mieux l'automatisme lié au *natural number bias*, selon lequel les nombres composant la fraction sont interprétés de façon indépendante, menant ainsi à croire que les nombres les plus grands signifient que la valeur de la fraction est plus grande. Toutefois, bien que cet automatisme soit largement présent chez les élèves de cet âge (p. ex., Gómez *et al.*, 2019), cela ne signifie pas qu'il a été présent chez tous les participants pour tous les items. En effet, différentes stratégies ont pu être utilisées pour évaluer la valeur des fractions, comme cela a été le cas dans les conditions « sans composante identique », que nous avons dû retirer en raison de la trop faible présence de l'automatisme étudié. D'ailleurs, l'exclusion de ces conditions a réduit de façon non négligeable, soit de moitié, le nombre d'items de la tâche, entraînant nécessairement une puissance statistique beaucoup plus faible. Au niveau cérébral, cela pourrait contribuer à expliquer que les résultats liés au cortex préfrontal ventrolatéral n'atteignent pas le seuil corrigé lors de l'analyse du cerveau entier. Le faible nombre d'items, combiné à la taille d'échantillon modeste, pourraient aussi contribuer à expliquer l'absence de différence significative entre les groupes au niveau comportemental. Par ailleurs, une autre limite concernant cette tâche de comparaison de fractions est liée à la facilité imprévue avec laquelle les participants semblent l'avoir réalisée. Bien que la tâche ait été conçue sur la base d'études antérieures avec des participants du même groupe d'âge, les participants de la présente étude ont indiqué des taux de réussite plus hauts et des temps de réponse plus courts que prévu (p. ex., les participants de l'étude de Gómez *et al.* [2019] répondaient en 2 à 3,5 secondes, alors que les participants de la présente étude ont répondu en 1 à 2,8 secondes). Ce niveau de difficulté trop faible a entraîné un effet plafond dans les données, ce qui a pu limiter l'observation de différences entre les groupes.

Finalement, le fait de réaliser cette tâche dans un appareil d'IRM était certainement inhabituel pour les participants. Il s'agit d'un contexte non seulement nouveau, mais aussi particulièrement

impressionnant, ayant pu occasionner un certain stress chez eux. La participation à une recherche en laboratoire représente en effet un contexte différent de la salle de classe, particulièrement lors de l'utilisation de l'IRMf, limitant le transfert des interprétations à la réalité quotidienne des élèves. D'ailleurs, les limites inhérentes à l'utilisation de l'IRMf s'appliquent évidemment aussi. Ce type de neuroimagerie permet une mesure indirecte des mécanismes cérébraux, par l'intensité de la réponse hémodynamique dans certaines régions du cerveau, alors que les effets d'un enseignement de la neuroplasticité sur la mobilisation du contrôle inhibiteur et la performance en comparaison de fractions est un phénomène complexe et multidimensionnel. L'interprétation des données et les implications pédagogiques potentielles sont également limitées par les connaissances actuelles au sujet du fonctionnement cérébral, qui progressent toujours, malgré leur essor fulgurant dans les dernières décennies. On retrouve d'ailleurs à ce jour encore peu de recherches portant sur les effets d'un enseignement de la neuroplasticité sur le fonctionnement cérébral; l'étude de ce phénomène dans la présente recherche contribue assurément à l'originalité du projet, mais rend évidemment l'interprétation des résultats plus délicate, puisqu'ils sont moins documentés. Ces résultats ne prétendent donc pas expliquer parfaitement le phénomène, mais permettent d'apporter un éclairage complémentaire aux autres recherches dans le domaine.

5.4 Perspectives de recherche futures

Le fait que les résultats de cette recherche permettent de confirmer partiellement ses hypothèses malgré l'ensemble des limites énoncées précédemment est particulièrement intéressant et ouvre la voie à différentes perspectives de recherche futures.

D'abord, les recherches visant à répliquer les résultats de la présente étude pourraient tenter de recruter un échantillon correspondant davantage à ce que nous recherchions : des élèves moins motivés, ou ayant une perception plus faible de leur compétence, en plus d'avoir davantage de difficulté dans les tâches nécessitant le contrôle inhibiteur. En effet, comme l'intervention cherche à augmenter la motivation et la mobilisation du contrôle inhibiteur (en plus des résultats à la tâche), il est nécessaire de recruter des participants d'une part à qui l'intervention s'adresse spécifiquement, et d'autre part qui disposent de latitude pour démontrer une amélioration. Évidemment, recruter un échantillon plus grand serait aussi souhaitable afin d'obtenir une meilleure puissance statistique, assurant également une plus grande équivalence des groupes en ce

qui a trait aux habiletés liées à la tâche (contrôle inhibiteur, mathématiques), mais aussi à d'autres variables possiblement confondantes, comme les capacités intellectuelles ou le niveau socioéconomique. Réaliser une étude comportant davantage de mesures de ces différentes variables en prétest serait aussi une façon de pallier les limites de notre échantillon, puisque les présents résultats ne permettent pas d'affirmer hors de tout doute que l'intervention est l'unique facteur associé aux différences observées. Par exemple, la capacité à mobiliser le contrôle inhibiteur de façon plus générale pourrait aussi être contrôlée en amont en administrant un test neuropsychologique classique de contrôle inhibiteur aux participants. Par ailleurs, dans le cas d'un plus grand échantillon, il serait d'autant plus pertinent de mesurer les effets plusieurs mois après l'intervention, à l'aide d'un posttest différé.

Le questionnaire motivationnel et la tâche de comparaison de fractions pourraient également être améliorés. L'effet plafond observé dans ces deux outils de mesure constitue l'une des limites importantes de cette étude. Ainsi, des recherches futures pourraient par exemple tenter d'élaborer un questionnaire motivationnel minimisant cet effet plafond, peut-être en formulant les énoncés de façon plus indirecte, afin d'éviter autant que possible un biais de désirabilité sociale (p. ex. : « Lorsqu'on me dit que mes erreurs me permettent de m'améliorer, je n'y crois pas vraiment. »). En parallèle, il serait aussi intéressant que des questionnaires motivationnels concernant d'autres disciplines soient développés. Concernant la tâche de comparaison de fractions, bien qu'elle ait été testée auprès de quelques participants pilotes dans le présent projet, il aurait été préférable de la tester à plus grande échelle afin de s'assurer de la saillance de l'automatisme étudié dans toutes les conditions ainsi que d'un niveau de difficulté plus adapté à la population visée. D'ailleurs, le manque de puissance statistique lié à la tâche (perte de la moitié des items en raison de l'élimination des conditions 3 et 4, et peu d'erreurs de la part des participants) a également rendu impossible la vérification de la dernière hypothèse, soit celle selon laquelle les participants du groupe expérimental porteraient davantage d'attention à la rétroaction négative que les participants du groupe contrôle. Un échantillon plus grand, combiné à un nombre d'items et un taux d'erreurs plus élevés dans la tâche de comparaison de fractions permettrait de vérifier cette hypothèse. Ainsi, concevoir une tâche semblable, mais optimisée afin de correspondre davantage aux compétences de l'échantillon et d'isoler au mieux l'automatisme serait également pertinent.

Comme il a été mentionné dans la section portant sur les limites de la recherche, l'intervention expérimentale testée dans le présent projet était courte et de nature plutôt passive. Une intervention plus longue et plus interactive, par exemple en discutant plus en profondeur des notions présentées ou en demandant aux participants de rédiger une lettre à un ami pour lui expliquer ce qu'ils viennent d'apprendre (faisant référence à l'effet *saying-is-believing*, [Higgins et Rholes, 1978]) aurait possiblement des impacts plus grands. Tel que mentionné précédemment, un autre élément ayant pu limiter la puissance des résultats de neuroimagerie est le fait que les réseaux associés au contrôle inhibiteur se développent tardivement. Étudier ce phénomène de façon développementale, en observant les effets auprès d'enfants plus jeunes, plus vieux, puis auprès d'adultes serait donc particulièrement intéressant. Par ailleurs, comme l'intervention visait à favoriser la mobilisation du contrôle inhibiteur dans une tâche contre-intuitive, il serait pertinent d'étudier ses effets dans le contexte d'autres tâches contre-intuitives, en mathématiques, mais également en sciences, discipline dans laquelle de nombreux concepts contre-intuitifs sont présents (Shtulman et Valcarcel, 2012).

Enfin, l'une des questions centrales qu'amènent à se poser les résultats de la présente étude est celle des variables modératrices entre l'enseignement de la neuroplasticité et les effets positifs sur les comportements orientés vers un but et la performance. Des recherches ultérieures devront assurément tenter d'éclaircir ces variables, notamment en approfondissant notre compréhension du rôle de la perception de compétence, en plus de cibler d'autres variables potentiellement en jeu. Par ailleurs, comme le rôle de la perception de compétence dans ce phénomène semble à ce jour relativement documenté, des recherches pourraient se pencher sur d'autres moyens de favoriser cette perception de compétence chez les élèves. Tel que mentionné à la section portant sur les implications pédagogiques, étudier de façon plus systématique les effets d'interventions visant spécifiquement à améliorer la perception de compétence (Burgoyne, 2020), tels que les effets d'activités proposant un défi adapté au niveau de compétence des élèves dans le but de leur faire vivre des réussites et ainsi améliorer cette perception, serait donc particulièrement pertinent.

Ainsi, des recherches futures investiguant ces pistes sont nécessaires afin d'aspirer à une meilleure compréhension des implications pratiques potentielles des résultats de la présente recherche, et du phénomène de façon plus générale, dans l'espoir que les retombées soient profitables au milieu de l'éducation et, plus particulièrement, aux élèves.

CONCLUSION

Le rôle du contrôle inhibiteur dans la difficulté à corriger des erreurs fréquentes et persistantes a fait l'objet de plusieurs travaux de recherche, amenant les chercheurs à se questionner sur les façons de favoriser sa mobilisation chez les élèves. Parmi les propositions visant à favoriser la mobilisation du contrôle inhibiteur, plusieurs recherches indiquaient qu'enseigner le concept de neuroplasticité semblait prometteur. La littérature à ce sujet expliquait cet effet par l'idée que certaines variables motivationnelles agissaient à titre de modérateurs entre un enseignement de la neuroplasticité et les comportements orientés vers un but (incluant la mobilisation du contrôle inhibiteur), notamment celle de croire qu'il est possible d'améliorer ses habiletés, soit l'idée au cœur de la théorie de l'état d'esprit.

La présente recherche avait donc pour objectif de mieux comprendre les effets d'un enseignement de la neuroplasticité sur différentes variables motivationnelles généralement associées à la théorie de l'état d'esprit, sur la mobilisation du contrôle inhibiteur et sur la performance à une tâche contre-intuitive en mathématiques, en tentant également d'éclaircir le rôle des variables motivationnelles intermédiaires dans ce phénomène. Deux groupes de 22 participants de 10 à 12 ans ont été comparés : l'un recevant l'enseignement de la neuroplasticité et l'autre recevant une intervention contrôle, les deux interventions se présentant sous la forme de courtes vidéos d'animation. Tous les participants ont répondu à un questionnaire motivationnel en prétest et en posttest et ont ensuite effectué une tâche contre-intuitive de comparaison de fractions dans un appareil d'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle, permettant de mesurer leur activité cérébrale liée à la mobilisation du contrôle inhibiteur.

Les résultats montrent que l'enseignement de la neuroplasticité a influencé de façon positive et significative dans le groupe expérimental, comparativement au groupe contrôle, trois des quatre variables motivationnelles étudiées : la perception de contrôle, la perception de l'erreur et la perception de compétence. La seule variable motivationnelle sur laquelle l'enseignement de la neuroplasticité n'a pas eu d'impact est la perception de la malléabilité des habiletés, soit paradoxalement le cœur de la théorie de l'état d'esprit. Les effets de l'intervention sur la mobilisation du contrôle inhibiteur sont quant à eux partiels. Les résultats cérébraux montrent que

les participants du groupe expérimental activent davantage des régions cérébrales liées à l'attention et au contrôle inhibiteur que ceux du groupe contrôle lors des items contre-intuitifs. Toutefois, cette plus grande mobilisation ne semble pas suffisante pour s'observer au niveau comportemental. En effet, aucune différence significative n'a été observée entre les groupes sur le plan des temps de réponse et des taux de réussite à la tâche de comparaison de fractions. Finalement, une analyse complémentaire a été réalisée afin de vérifier si le changement dans les variables motivationnelles était lié à l'activité cérébrale associée au contrôle inhibiteur, et si tel était le cas, quels étaient les poids relatifs de chacune des variables. Seul le changement dans la perception de compétence a permis de prédire significativement l'activité cérébrale associée au contrôle inhibiteur, suggérant qu'il s'agit de la variable motivationnelle jouant un rôle prépondérant dans la relation entre un enseignement de la neuroplasticité et la mobilisation du contrôle inhibiteur.

À la lumière de ces résultats et des résultats de recherche antérieurs, il semble qu'un enseignement du concept de neuroplasticité (incluant des encouragements à l'utilisation de diverses stratégies), même modeste, puisse avoir des effets positifs sur la motivation et certains comportements orientés vers un but, comme la mobilisation du contrôle inhibiteur. Les résultats de la présente recherche appuient l'idée selon laquelle cet effet s'expliquerait par la variable modératrice, et peut-être même médiatrice, que constitue la perception de compétence dans cette relation. Ainsi, ce serait parce qu'ils se sentent plus compétents à la suite de l'intervention que les élèves activent davantage des régions associées à l'attention et au contrôle inhibiteur. Bien que cette recherche n'ait pas observé d'effets de l'enseignement de la neuroplasticité directement sur la performance à la tâche de comparaison de fractions, l'ensemble des résultats représente une avancée somme toute positive.

D'un point de vue pédagogique, une intervention visant à enseigner la neuroplasticité telle que celle étudiée dans la présente recherche semble présenter un rapport coûts-bénéfices intéressant. En effet, cette intervention courte et peu coûteuse peut avoir des effets significatifs sur la motivation des élèves, ce qui est déjà positif en soi. Mais plus encore, elle peut amener les élèves à mobiliser davantage des régions cérébrales pertinentes pour l'apprentissage. En salle de classe, il est même possible de tirer encore davantage profit de cette courte vidéo, en la suspendant après certains segments pour en discuter avec les élèves. L'enseignant peut également renforcer quotidiennement son message par des commentaires et rétroactions faisant référence à la capacité de leur cerveau à s'améliorer et à utiliser diverses stratégies pour y arriver, mais peut-être surtout

à sa capacité à réussir les tâches proposées. En effet, cette recherche visait notamment à éclaircir l'influence de chacune des variables motivationnelles sur la mobilisation du contrôle inhibiteur, et les résultats suggèrent que ce serait la perception de compétence qui semble la plus directement liée aux comportements orientés vers un but. Comme cette relation est de plus en plus documentée, professionnels de l'éducation et chercheurs pourraient se pencher plus systématiquement sur les différentes façons d'améliorer la perception de compétence des élèves. L'une des manières les plus directes pour le faire consiste à faire vivre des réussites aux élèves, notamment en leur proposant des tâches adaptées à leur niveau de compétence. Cela pourrait permettre de mieux outiller les enseignants sur le plan des pratiques pédagogiques efficaces et ultimement favoriser l'apprentissage chez les élèves.

Ainsi, cette recherche apporte un éclairage supplémentaire, et complémentaire, au phénomène lié aux effets d'un enseignement de la neuroplasticité, ou d'une intervention de type *état d'esprit*, sur les comportements orientés vers un but et la performance. Bien que les résultats de cette recherche doivent être interprétés avec prudence, il paraît permis de penser que ce type d'intervention représente un choix de pratique pédagogique avantageux. La mise en lumière du rôle de la perception de compétence dans ce phénomène ouvre également la voie à d'autres recherches et pratiques pédagogiques contribuant à aider les enseignants à faire des choix pédagogiques judicieux et éclairés.

ANNEXE A

FORMULAIRE DE CONSENTEMENT



Formulaire d'information et de consentement

Titre du projet de recherche :	Effets de différentes façons d'enseigner les sciences et les mathématiques sur l'apprentissage et sur le cerveau
Chercheur responsable du projet de recherche :	Steve Masson Ph. D., professeur, Université du Québec à Montréal
Co-chercheur :	Patrice Potvin Ph. D., professeur, Université du Québec à Montréal
Membres du personnel de recherche :	<ul style="list-style-type: none">▪ Jérémie Blanchette Sarrasin, étudiante au doctorat, Université du Québec à Montréal.▪ Sophie McMullin, étudiante à la maîtrise, Université du Québec à Montréal.▪ Élisabeth Bélanger, étudiante à la maîtrise, Université du Québec à Montréal.
Organisme subventionnaire :	Conseil de recherches en sciences humaines du Canada
Établissement participant :	Centre intégré universitaire de santé et de services sociaux du Centre-Sud-de l'Île-de-Montréal. CCSMTL – IUGM

1. Introduction

Nous invitons votre enfant à participer à un projet de recherche. Cependant, avant d'accepter qu'il participe à ce projet et de signer ce formulaire d'information et de consentement à titre de représentant de votre enfant, 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 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.

2. Nature et objectifs du projet de recherche

Votre enfant est invité à participer à un projet de recherche en neuroimagerie, réalisé à l'aide de l'imagerie par résonance magnétique (IRM).

Ce projet vise à mieux comprendre les effets de différentes façons d'enseigner des concepts en sciences et en mathématiques. Plus précisément, ce projet s'intéresse à ces effets sur le plan des apprentissages réalisés et sur le plan des mécanismes cérébraux activés.

Les résultats de ce projet pourraient, à terme, contribuer à mener à de nouvelles pistes d'intervention en salle de classe, susceptibles d'aider les élèves à mieux apprendre les sciences et les mathématiques. Pour la réalisation de ce projet de recherche, nous comptons recruter 90 participants, garçons et filles, droitiers, âgés de 10 à 12 ans et fréquentant une classe régulière de 5^e ou de 6^e année d'une école francophone.

3. Déroulement du projet de recherche

3.1 Lieu de réalisation du projet de recherche, durée et nombre de visites

Ce projet de recherche se déroulera à l'IUGM. Il comprend un volet concernant l'apprentissage des sciences et un volet concernant l'apprentissage des mathématiques. Si votre enfant participe aux deux volets de l'étude, ce projet comprendra une seule visite de 3 heures ou, si vous le souhaitez, deux visites de 2 heures. Si votre enfant participe à un seul volet, la durée est de 2 heures en une seule visite.

La durée indiquée comprend l'accueil, la visite des installations, une période de pratique préalable dans un simulateur d'IRM, l'installation de votre enfant dans l'appareil d'IRM et des pauses.

3.2 Nature de la participation

3.2.1 Première étape.

La participation de votre enfant à ce projet impliquera une première étape. En effet, pour s'assurer que votre enfant est éligible à participer au projet, un court test de connaissances en sciences et en mathématiques lui sera administré, en plus d'un court questionnaire motivationnel. Les tests seront complétés en ligne ou administrés à son école par un enseignant ou un assistant de recherche. La complétion de ces tests demande au total environ 30 minutes.

3.2.2 Deuxième étape.

Avant de réaliser la séance d'IRM, une séance de simulation aura lieu. Durant cette séance de simulation, votre enfant entrera dans un appareil de simulation qui ressemble à un véritable appareil d'IRM. Votre enfant pratiquera les tâches à l'intérieur du simulateur pour qu'il puisse se familiariser avec la manette de réponse et l'environnement de l'IRM. De plus, 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 votre enfant. S'il participe au volet sur l'apprentissage des mathématiques, votre enfant sera également invité à regarder un court film d'animation (3 minutes) sur l'ordinateur.

3.2.3 Troisième étape.

En fonction du profil de réponses données au test de connaissances en sciences et en mathématiques, votre enfant pourra participer au volet concernant les sciences, au volet concernant les mathématiques ou aux deux volets.

Volet en sciences : Votre enfant répondra à des questions en sciences et regardera un enregistrement vidéo montrant une ou deux courtes séquences d'enseignement portant sur une notion scientifique. Les questions consisteront en des séries d'images montrant chaque fois des objets. Votre enfant aura à déterminer, pour chaque image, lequel des objets représente la réponse correcte en appuyant sur le bouton d'une manette. Les questions sont divisées en six blocs d'environ 4 minutes avec des pauses.

Volet en mathématiques : Dans l'appareil IRM, votre enfant aura à répondre à des questions en mathématiques. Les questions consisteront en des séries de représentations mathématiques pour lesquelles votre enfant aura à déterminer laquelle des représentations représente la réponse correcte en appuyant sur les boutons d'une manette. Les questions sont divisées en trois blocs d'un maximum de 10 minutes avec des pauses.

S'il participe aux deux volets en une seule séance, votre enfant aura une pause entre les deux volets pour marcher et prendre une collation, le cas échéant.

3.3 Description de l'appareil d'imagerie par résonance magnétique (IRM).

L'imagerie par résonance magnétique, réalisée en recherche, donne des images du corps et 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 l'imagerie par résonance magnétique, 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 lui permettra de communiquer avec le technologue en imagerie médicale au besoin. Pour son confort, 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 qu'il demeure immobile. Pour ce faire, un coussinet sera placé autour de sa tête afin d'assurer son immobilité.

4. Découverte fortuite

Bien qu'ils ne fassent pas l'objet d'une évaluation médicale formelle, les résultats de tous les tests, examens et

procédures réalisés dans le cadre de ce projet de recherche 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 vous appellera pour assurer un suivi.

5. 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.

6. Risques associés au projet de recherche

6.1 Imagerie par résonance magnétique.

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 vous souffrez de claustrophobie. La vérification rigoureuse de la présence de contre-indication sera assumée par le technologue en imagerie médicale.

De plus, les conditions imposées par l'utilisation de l'appareil 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. Il pourrait aussi ressentir un certain stress.

7. 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 y participe. Vous pouvez également le retirer de ce projet à n'importe quel moment, sans avoir à donner de raisons, en informant l'équipe de recherche.

Le chercheur responsable de ce projet de recherche, le Comité d'éthique de la recherche vieillissement-neuroimagerie ou l'organisme subventionnaire peuvent mettre fin à sa participation, sans votre consentement. Cela peut se produire 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 encore s'il existe des raisons administratives d'abandonner le projet.

Si vous le retirez du projet ou s'il est retiré du projet, l'information et le matériel déjà recueillis dans le cadre de ce projet seront néanmoins conservés, analysés ou utilisés pour assurer l'intégrité du projet.

Toute nouvelle connaissance acquise durant le déroulement du projet qui pourrait avoir un impact sur votre décision de laisser votre enfant continuer à participer à ce projet vous sera communiquée rapidement.

8. Confidentialité

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

Ces renseignements peuvent comprendre les informations concernant son état de santé passé et présent ses habitudes de vie ainsi que les résultats de tous les tests, examens et procédures qui seront réalisés. Son dossier peut aussi comprendre d'autres renseignements tels que son nom, sa date de naissance, son sexe, son origine ethnique, sa préférence manuelle ainsi que son cheminement scolaire et ses antécédents scolaires.

Tous les renseignements recueillis demeureront confidentiels dans les limites prévues par la loi. Afin de préserver son identité et la confidentialité de ces 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.

Ces données de recherche seront conservées pendant au moins 7 ans par le chercheur responsable de ce projet de recherche.

Les données de recherche pourront être publiées ou faire l'objet de discussions scientifiques, mais il ne sera pas possible d'identifier votre enfant.

À des fins de surveillance, de contrôle, de protection, de sécurité, son dossier de recherche pourra être consulté par une personne mandatée par des organismes réglementaires ainsi que par des représentants de l'organisme subventionnaire, de l'établissement ou du Comité d'éthique de la recherche vieillissement-neuroimagerie. Ces personnes et ces organismes adhèrent à une politique de confidentialité.

Vous avez le droit de consulter son dossier de recherche pour vérifier les renseignements recueillis et les faire rectifier au besoin.

9. Utilisation secondaire des données de recherche

Acceptez-vous que les données de recherche de votre enfant soient utilisées par le chercheur responsable pour réaliser d'autres projets de recherche soit dans le domaine de la neuroscience du vieillissement ou 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 d'éthique de la recherche vieillissement-neuroimagerie avant leur réalisation. De plus, le Comité en assurera le suivi. Ses données de recherche seront conservées de façon sécuritaire sur des serveurs informatiques 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 non-utilisation de ses données de recherche en vous adressant au chercheur responsable de ce projet de recherche.

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

10. Participation à des études ultérieures

Acceptez-vous que le chercheur responsable de ce projet de recherche ou un membre de son personnel de recherche reprenne contact avec vous pour inviter votre enfant à 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**

11. Possibilité de commercialisation

Les résultats de la recherche découlant notamment de la participation de votre enfant pourraient mener à la création de produits commerciaux et générer des profits. Cependant, il ne pourra en retirer aucun avantage financier.

12. Financement du projet de recherche

Le chercheur responsable de ce projet de recherche a reçu un financement de l'organisme subventionnaire pour mener à bien ce projet de recherche.

13. Compensation

13.1 Participation aux deux volets (mathématiques et sciences)

En guise de compensation pour les frais encourus en raison de la participation de votre enfant au projet de recherche, vous recevrez un montant de 250 dollars. Si la participation aux deux volets se déroule en deux visites, un premier montant de 125 dollars est donné à la suite de la première visite et un deuxième montant de 125 dollars après la deuxième visite.

13.2 Participation à un seul volet (mathématiques ou sciences)

En guise de compensation pour les frais encourus en raison de la participation de votre enfant au projet de recherche, vous recevrez un montant de 150 dollars.

14. En cas de préjudice

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.

En acceptant qu'il 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, l'organisme subventionnaire et l'établissement de leur responsabilité civile et professionnelle.

15. Procédures en cas d'urgence médicale

Veuillez noter que l'IUGM 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.

16. Identification des personnes-ressources

Si vous avez des questions ou si votre enfant éprouve des problèmes en lien avec le projet de recherche ou si vous souhaitez le retirer, vous pouvez communiquer avec le chercheur responsable de ce projet de recherche ou avec une personne de l'équipe de recherche au numéro suivant 514.987.3000, poste 5502.

Pour toute question concernant ses droits en tant que participant à ce projet de recherche ou si vous avez des plaintes ou des commentaires à formuler, vous pouvez communiquer avec le commissaire aux plaintes et à la qualité des services du CIUSSS du Centre-Sud-de-l'Île-de-Montréal, au 514.593.3600.

17. Surveillance des aspects éthiques du projet de recherche

Le Comité d'éthique de la recherche vieillissement-neuroimagerie a approuvé le projet de recherche et en assurera le suivi. Pour toute information, vous pouvez joindre le Comité, par téléphone au 514.527.9565, poste 3223 ou par courriel à l'adresse suivante: karima.bekhiti.ccsmtl@ssss.gouv.qc.ca

Consentement.

Titre du projet de recherche : Effets de différentes façons d’enseigner les sciences et les mathématiques sur l’apprentissage sur l’apprentissage et sur le cerveau

1. Consentement du représentant

En ma qualité de représentant, j’ai pris connaissance du formulaire d’information et de consentement. On m’a expliqué le projet de recherche et le présent formulaire d’information et de consentement. On a répondu à mes questions et 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

a) Assentiment écrit de l’enfant capable de signer son nom et capable de comprendre la nature du projet.

Assentiment écrit de l’enfant

b) Nom et signature du représentant à savoir soit le parent soit le tuteur.

Nom du représentant à savoir soit le parent soit le tuteur

Signature du représentant 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 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 du participant les termes du présent formulaire d’information et de consentement et que l’on a répondu aux questions qu’il avait.

Je certifie que l’on a expliqué à l’enfant 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 une copie signée et datée au représentant.

Nom et signature du chercheur responsable de ce projet de recherche

Date

ANNEXE B

FORMULAIRE DE DÉPISTAGE POUR ÉTUDE 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 ?		
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.		

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 C

PARAMÈTRES D'ACQUISITION DES IMAGES ANATOMIQUES ET FONCTIONNELLES

Images anatomiques (T1; MPRAGE avec accélération de r = 3, 4m11s)	Appareil : Siemens Prisma Fit 3,0 T Temps de répétition = 2400 ms Temps d'inversion = 1000 ms (« inversion time ») Temps d'écho : 2,17 ms « Flip angle » : 8 degrés Taille des voxels : 1,0 x 1,0 x 1,0 mm Ordre d'acquisition : « interleaved » Nombre de tranches : 176 « Field of view » : 224 mm Résolution dans le plan (matrice) : 224 x 224 Antenne de tête : 32 canaux
Images fonctionnelles (T2*)	Appareil : Siemens Prisma Fit 3,0 T Temps de répétition = 853 ms Temps d'écho = 25 ms « Flip angle » : 62 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 : 42 « Field of view » : 222 mm Résolution dans le plan (matrice) : 74 x 74 Antenne de tête : 32 canaux Épaisseur des tranches : 3,0 mm Espace entre les tranches : 0 %

ANNEXE D

QUESTIONNAIRE DE PRÉSÉLECTION EN MATHÉMATIQUES

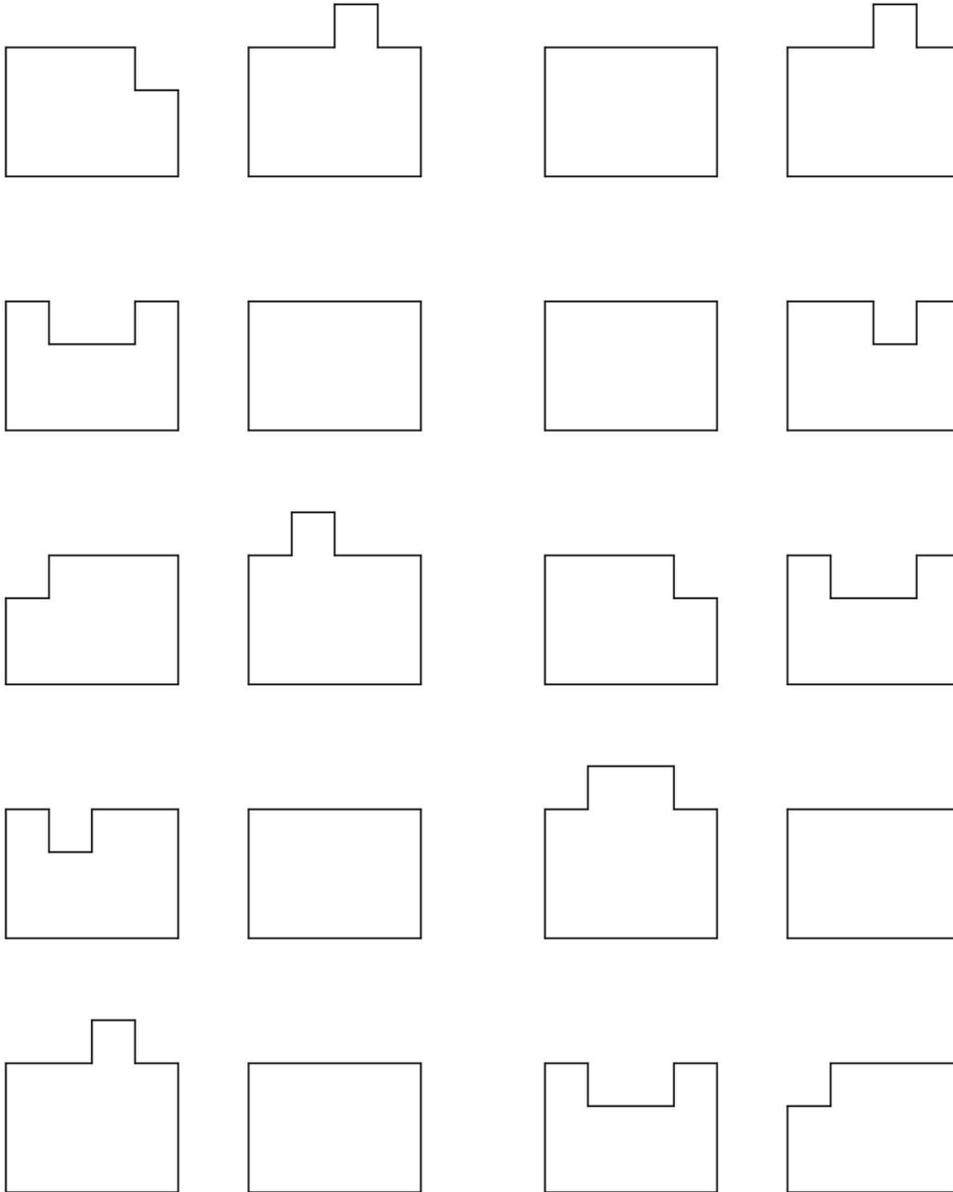
Question 1

Pour chaque paire de fractions, encercle celle qui est la plus grande, c'est-à-dire qui représente la plus grande quantité.

$\frac{5}{9}$ $\frac{7}{9}$	$\frac{4}{9}$ $\frac{4}{15}$
$\frac{3}{5}$ $\frac{3}{8}$	$\frac{5}{12}$ $\frac{7}{12}$
$\frac{6}{17}$ $\frac{6}{13}$	$\frac{8}{11}$ $\frac{6}{11}$
$\frac{5}{8}$ $\frac{5}{14}$	$\frac{7}{16}$ $\frac{7}{11}$
$\frac{2}{5}$ $\frac{4}{5}$	$\frac{5}{16}$ $\frac{9}{16}$

Question 2

Pour chaque paire de figures, encercle celle qui a le plus grand périmètre (contour).



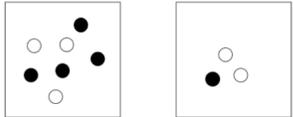
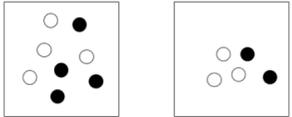
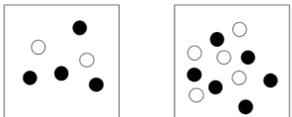
Question 3

Pour chaque paire de nombres à virgule, encercle celui qui est le plus grand, c'est-à-dire celui qui représente la plus grande quantité.

1,53 1,3	3,6 3,453
7,4 7,644	4,536 4,6
5,644 5,4	1,45 1,5
5,384 5,8	2,3 2,637
6,4 6,699	8,7 8,58

Question 4

Pour chaque paire de boîtes contenant des billes noires et blanches, encercle la boîte pour laquelle il y a une plus grande probabilité de piger une bille noire.

ANNEXE E

QUESTIONNAIRE MOTIVATIONNEL

Pour chaque énoncé, encercle le numéro qui correspond le mieux à ce que tu penses.

Énoncés	Pas du tout d'accord	Pas d'accord	Pas vraiment d'accord	Un peu d'accord	D'accord	Tout à fait d'accord
1. Je ne peux pas vraiment m'améliorer en mathématiques.	1	2	3	4	5	6
2. Peu importe si je suis bon(ne) ou non en mathématiques, je peux toujours devenir meilleur(e).	1	2	3	4	5	6
3. Mes habiletés en mathématiques ne peuvent pas vraiment s'améliorer.	1	2	3	4	5	6
4. Mes habiletés en mathématiques peuvent toujours s'améliorer.	1	2	3	4	5	6
5. Avec de la pratique, je peux m'améliorer en mathématiques.	1	2	3	4	5	6
6. Si je fais des efforts en mathématiques, je vais m'améliorer.	1	2	3	4	5	6
7. Si j'utilise de bonnes stratégies, je serai capable d'avoir de bons résultats en mathématiques.	1	2	3	4	5	6
8. Mes erreurs en mathématiques sont utiles, car elles me permettent de comprendre et de m'améliorer.	1	2	3	4	5	6
9. Quand j'ai de la difficulté dans un exercice en mathématiques, je peux quand même arriver à le réussir.	1	2	3	4	5	6
10. Quand je fais des erreurs en mathématiques, cela me permet d'apprendre.	1	2	3	4	5	6
11. Je suis bon(ne) en mathématiques.	1	2	3	4	5	6
12. J'ai de la difficulté à comprendre tout ce qui concerne les mathématiques.	1	2	3	4	5	6
13. Je suis l'un(e) des meilleur(e)s de ma classe en mathématiques.	1	2	3	4	5	6
14. Comparé aux autres élèves de ma classe, je ne suis pas très bon(ne) en mathématiques.	1	2	3	4	5	6
15. Je pense obtenir d'excellents résultats en mathématiques cette année.	1	2	3	4	5	6
16. Je ne suis pas très bon(ne) pour apprendre de nouvelles choses en mathématiques.	1	2	3	4	5	6
17. Je comprends facilement les mathématiques.	1	2	3	4	5	6

ANNEXE F

STIMULI DE LA TÂCHE

Condition 1

Intuitifs avec composante identique	
5/9	7/9
8/11	6/11
5/12	7/12
3/7	1/7
2/5	3/5
13/14	9/14
3/8	5/8
11/13	8/13
14/17	10/17
3/11	5/11
2/7	4/7
7/9	4/9

Condition 2

Contre-intuitifs avec composante identique	
4/9	4/5
2/5	2/9
5/7	5/13
3/5	3/8
7/9	7/16
8/9	8/13
9/14	9/11
10/13	10/17
11/16	11/13
1/3	1/9
4/9	4/15
5/8	5/14

Condition 3

Intuitifs sans composante identique	
4/7	1/3
3/14	9/17
9/16	1/3
3/5	11/13
11/15	4/9
2/3	6/7
5/12	1/6
4/9	11/16
7/12	2/5
1/6	3/7
5/9	2/7
3/8	9/14

Condition 4

Contre-intuitifs sans composante identique	
8/15	5/6
4/5	6/13
5/17	2/3
3/4	6/13
5/8	7/15
6/13	4/5
5/6	7/12
8/15	7/9
3/5	5/14
5/9	3/4
5/7	6/11
3/5	4/9

RÉFÉRENCES

- Aguirre, G. K. (2003). Functional imaging in behavioral neurology and cognitive neuropsychology. In T. E. Feinberg et M. J. Farah (Eds.), *Behavioral neurology and neuropsychology*. (2nd ed.). McGraw-Hill.
- Allaire-Duquette, G., Bélanger, M., Grabner, R. H., Koschutnig, K. et Masson, S. (2019). Individual differences in science competence among students are associated with ventrolateral prefrontal cortex activation. *Journal of neuroscience research*, 97(9), 1163-1178.
- Aron, A. R., Robbins, T. W. et Poldrack, R. A. (2014). Right inferior frontal cortex: addressing the rebuttals. *Frontiers in Human Neuroscience*, 8, 905.
- Aronson, J., Fried, C. B. et Good, C. (2002). Reducing the effects of stereotype threat on African American college students by shaping theories of intelligence. *Journal of Experimental Social Psychology*, 38(2), 113-125.
- Ashburner J. et Friston K.J. (2005). Unified segmentation. *NeuroImage*, 26, 839–851.
- Babai, R., Cohen, E. et Stavy, R. (2018). Proportional reasoning: Reducing the interference of natural numbers through an intervention based on the problem-solving framework of executive functions. *Neuroéducation*, 5(2), 109-118.
- Babai, R., Shalev, E. et Stavy, R. (2015). A warning intervention improves students' ability to overcome intuitive interference. *ZDM Mathematics Education*, 47, 735–745.
- Babai, R., Younis, N. et Stavy, R. (2014). Involvement of inhibitory control mechanisms in overcoming intuitive interference. *Neuroéducation*, 3(1), 1-9.
- Babai, R., Zilber, H., Stavy, R. et Tirosh, D. (2010). The effect of intervention on accuracy of students' responses and reaction times to geometry problems. *International Journal of Science and Mathematics Education*, 8(1), 185-201.
- Badre, D. et Wagner, A. D. (2007). Left ventrolateral prefrontal cortex and the cognitive control of memory. *Neuropsychologia*, 45(13), 2883-2901.
- Baillargeon, N. (2013). *Légendes pédagogiques : l'auto-défense intellectuelle en éducation*. Les Éditions Poètes de brousse.
- Bahník, Š. et Vranka, M. A. (2017). Growth mindset is not associated with scholastic aptitude in a large sample of university applicants. *Personality and Individual Differences*, 117, 139-143.
- Baird, G. L., Scott, W. D., Dearing, E. et Hamill, S. K. (2009). Cognitive self-regulation in youth with and without learning disabilities: Academic self-efficacy, theories of intelligence,

- learning vs. performance goal preferences, and effort attributions. *Journal of Social and Clinical Psychology*, 28(7), 881-908.
- Bandura, A. (1977). Self-efficacy: Toward a unifying theory of behavioral change. *Psychological Review*, 84, 191–215.
- Bandura, A. (1988). Self-regulation of motivation and action through goal systems. In Reeve, J. (2018). *Understanding Motivation and Emotion* (7th ed.). Wiley
- Bandura, A. (2001). Social cognitive theory: An agentic perspective. *Annual Review of Psychology*, 52(1), 1–26.
- Baron, R. M. et Kenny, D. A. (1986). The moderator–mediator variable distinction in social psychological research: Conceptual, strategic, and statistical considerations. *Journal of personality and social psychology*, 51(6), 1173.
- Bisra, K., Liu, Q., Nesbit, J. C., Salimi, F. et Winne, P. H. (2018). Inducing self-explanation: A meta-analysis. *Educational Psychology Review*, 30, 703–725.
- Blackwell, L. S., Trzesniewski, K. H. et Dweck, C. S. (2007). Implicit theories of intelligence predict achievement across an adolescent transition: A longitudinal study and an intervention. *Child Development*, 78(1), 246-263.
- Blanchette Sarrasin, J., Brault Foisy, L.-M., Auclair, A., Riopel, M. et Masson, S. 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.
- Blanchette Sarrasin, J., Nenciovici, L., Brault Foisy, L.-M., Allaire-Duquette, G., Riopel, M. et Masson, S. (2018). Effects of Teaching the Concept of Neuroplasticity to Induce a Growth Mindset on Motivation, Achievement, and Brain Activity: A Meta-Analysis. *Trends in Neuroscience and Education*, 12, 22-31.
- Boaler, J. (2013). Ability and mathematics: The mindset revolution that is reshaping education. *Forum*, 55, 143-152.
- Boaler, J., Dieckmann, J. A., Perez Núñez, G., Liu Sun, K. et Williams, C. (2018). Changing students minds & achievement in mathematics: The impact of a free online student course. *Frontiers in Education*, 3, 26.
- Boen, R., Raud, L. et Huster, R. J. (2022). Inhibitory control and the structural parcellation of the right inferior frontal gyrus. *Frontiers in Human Neuroscience*, 16, 787079.
- Botvinick, M. M. (2007). Conflict monitoring and decision making: reconciling two perspectives on anterior cingulate function. *Cognitive, Affective, & Behavioral Neuroscience*, 7(4), 356-366.

- Brault Foisy, L.-M., Potvin, P., Riopel, M. et Masson, S. (2015). Is inhibition involved in overcoming a common physics misconception in mechanics? *Trends in Neuroscience and Education*, 4(1-2), 26-36.
- Brault Foisy, L.-M., Ahr, E., Masson, S., Borst, G. et Houdé, O. (2015). Blocking Our Brain: How We Can Avoid Repetitive Mistakes!. *Frontiers for Young Minds*, 3(17), 1-9.
- Brault Foisy, L.-M., Matejko, A. A., Ansari, D. et Masson, S. (2020). Teachers as orchestrators of neuronal plasticity: effects of teaching practices on the brain. *Mind, Brain, and Education*, 14(4), 415-428.
- Bull, R. et Scerif, G. (2001). Executive functioning as a predictor of children's mathematics ability: Inhibition, switching, and working memory. *Developmental neuropsychology*, 19(3), 273-293.
- Burgoyne, A. P., Hambrick, D. Z. et Macnamara, B. N. (2020). How firm are the foundations of mind-set theory? The claims appear stronger than the evidence. *Psychological Science*, 31(3), 258-267.
- Bush, G., Whalen, P. J., Rosen, B. R., Jenike, M. A., McInerney, S. C. et Rauch, S. L. (1998). The counting Stroop: an interference task specialized for functional neuroimaging – validation study with functional MRI. *Human brain mapping*, 6(4), 270-282.
- Button, K. S., Ioannidis, J. P., Mokrysz, C., Nosek, B. A., Flint, J., Robinson, E. S. et Munafò, M. R. (2013). Power failure: why small sample size undermines the reliability of neuroscience. *Nature reviews neuroscience*, 14(5), 365-376.
- Cai, W., Duberg, K., Padmanabhan, A., Reher, R., Bradley, T., Carrion, V. et Menon, V. (2019). Hyperdirect insula-basal-ganglia pathway and adult-like maturity of global brain responses predict inhibitory control in children. *Nature communications*, 10(1), 4798.
- Cai, W., Ryali, S., Chen, T., Li, C. S. R. et Menon, V. (2014). Dissociable roles of right inferior frontal cortex and anterior insula in inhibitory control: evidence from intrinsic and task-related functional parcellation, connectivity, and response profile analyses across multiple datasets. *Journal of Neuroscience*, 34(44), 14652-14667.
- Chambers, C. D., Garavan, H. et Bellgrove, M. A. (2009). Insights into the neural basis of response inhibition from cognitive and clinical neuroscience. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 33(5), 631-646.
- Charalambous, C. Y. et Pitta-Pantazi, D. (2007). Drawing on a theoretical model to study students' understandings of fractions. *Educational Studies in Mathematics*, 64(3), 293-316.
- Chen, J. A. et Pajares, F. (2010). Implicit Theories of Ability of Grade 6 Science Students: Relation to Epistemological Beliefs and Academic Motivation and Achievement in Science. *Contemporary Educational Psychology*, 35, 75-87.

- Chen, L., Bae, S. R., Battista, C., Qin, S., Chen, T., Evans, T. M. et Menon, V. (2018). Positive attitude toward math supports early academic success: Behavioral evidence and neurocognitive mechanisms. *Psychological science*, 29(3), 390-402.
- Cohen, J. (1988). *Statistical power analysis for the behavioral sciences* (2nd ed.). Erlbaum.
- Cohen, J. (1992). A power primer. *Psychological Bulletin*, 112(1), 155–159.
- Cragg, L. et Gilmore, C. (2014). Skills underlying mathematics: the role of executive function in the development of mathematics proficiency. *Trends in Neuroscience and Education*, 3, 63-68.
- D'Amico, A. et Passolunghi, M. C. (2009). Naming speed and effortful and automatic inhibition in children with arithmetic learning disabilities. *Learning and Individual Differences*, 19(2), 170-180.
- D'angiulli, A., Van Roon, P. M., Weinberg, J., Oberlander, T., Grunau, R., 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.
- Da Fonseca, D., Schiano-Lomoriello, S., Cury, F., Poinso, F., Rufo, M. et Therme, P. (2007). Validité factorielle d'un questionnaire mesurant les théories implicites de l'intelligence. *L'Encéphale*, 33, 579-584.
- De Vriendt, S. et Van Nieuwenhoven, C. (2010). *L'enfant en difficulté d'apprentissage en mathématiques : piste de diagnostic et support d'intervention*. Solal.
- Deci, E. L. et Ryan, R. M. (2000). The " what " and " why " of goal pursuits: Human needs and the self-determination of behavior. *Psychological inquiry*, 11(4), 227-268.
- Delalande, L., Moyon, M., Tissier, C., Dorriere, V., Guillois, B., Mevell, K., ... Borst, G. (2020). Complex and subtle structural changes in prefrontal cortex induced by inhibitory control training from childhood to adolescence. *Developmental science*, 23(4), e12898.
- DePasque Swanson, S. et Tricomi, E. (2014). Goals and task difficulty expectations modulate striatal responses to feedback. *Cognitive, Affective, & Behavioral Neuroscience*, 14, 610-620.
- 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.
- Diamond, A. (2013). Executive functions. *Annual review of psychology*, 64, 135-168.
- Dommett, E. J., Devonshire, I. M., Sewter, E. et Greenfield, S. A. (2013). The impact of participation in a neuroscience course on motivational measures and academic performance. *Trends in Neuroscience and Education*, 2(3), 122-138.

- Doucet, M., Bouffard, T. et Vezeau, C. (2020). Le rôle de la préoccupation envers l'erreur dans la relation entre la théorie implicite de l'intelligence et la perception de compétence. *Journal of Interpersonal Relations, Intergroup Relations and Identity*, 13, 23-37
- Duncan, G. J., Dowsett, C. J., Claessens, A., Magnuson, K., Huston, A. C., Klebanov, P., ... Sexton, H. (2007). School readiness and later achievement. *Developmental psychology*, 43(6), 1428.
- Dupeyrat, C. et Mariné, C. (2004). Conceptions de l'intelligence, orientations de buts et stratégies d'apprentissage chez des adultes en reprise d'études. *Revue des sciences de l'éducation*, 30(1), 27-48.
- Dweck, C. et Molden, D. C. (2000). Self-theories. *Handbook of competence and motivation*, 122-140.
- Dweck, C. S. (2000). *Self-theories: Their role in motivation, personality, and development*. Psychology press.
- Dweck, C. S. (2002). The development of ability conceptions. Dans A. Wigfield et J. S. Eccles (Eds.), *The development of achievement motivation*. Academic Press.
- Dweck, C. S. (2006). *Mindset: The new psychology of success*. Random House Digital, Inc.
- Dweck, C. S. (2017). The journey to children's mindsets—and beyond. *Child Development Perspectives*, 11(2), 139-144.
- Dweck, C. S. et Leggett, E. L. (1988). A social-cognitive approach to motivation and personality. *Psychological review*, 95(2), 256.
- Dweck, C. S. et Sorich, L. (1999). Mastery-oriented thinking. *Coping*, 11, 232-251.
- Eccles, J. S. et Wigfield, A. (2002). Motivational beliefs, values, and goals. *Annual Review of Psychology*, 53, 109–132.
- Ell, S. W., Helie, S., Hutchinson, S., Costa, A. et Villalba, E. (2011). Contributions of the putamen to cognitive function. *Horizons in neuroscience research*, 7.
- Erdley, C.A. et Dweck, C.S. (1993). Children's implicit personality theories as predictors of their social judgments. *Child Development*, 64(3), 863-878.
- Eriksen, B. A. et Eriksen C. W. (1974). Effects of noise letters upon the identification of target letters in a non-search task. *Perception & Psychophysics*, 16, 143-49.
- Fischbein, E. et Schnarch, D. (1997). Brief report: The evolution with age of probabilistic, intuitively based misconceptions. *Journal for Research in Mathematics Education*, 28(1), 96-105.

- Fortin, M.-F. (2010). *Fondements et étapes du processus de recherche, Méthodes quantitatives et qualitatives* (2^e éd.). Chenelière Éducation.
- Fréchette-Simard, C., Plante, I., Dubeau, A. et Duchesne, S. (2019). La motivation scolaire et ses théories actuelles : une recension théorique. *McGill Journal of Education/Revue des sciences de l'éducation de McGill*, 54(3), 500-518.
- Friston, K., Williams, S., Howard, R., Frackowiak, R. et Turner, R. (1996). Movement-related effects in fMRI time-series. *Magnetic Resonance in Medicine*, 35(3), 346-355.
- GarCía-Cepero, M. C. et McCoach, D. B. (2009). Educators' implicit theories of intelligence and beliefs about the identification of gifted students. *Universitas psychologica*, 8(2), 295-310.
- Garon-Carrier, G., Boivin, M., Guay, F., Kovas, Y., Dionne, G., Lemelin, J. P., ... Tremblay, R. E. (2016). Intrinsic motivation and achievement in mathematics in elementary school: A longitudinal investigation of their association. *Child development*, 87(1), 165-175.
- Geake, J.G. et P. Cooper (2003). Cognitive neuroscience: Implications for education, *Westminster Studies in Education*, 26(1), 7-20.
- Gilmore, C., Attridge, N., Clayton, S., Cragg, L., Johnson, S., Marlow, N., ... Inglis, M. (2013). Individual differences in inhibitory control, not non-verbal number acuity, correlate with mathematics achievement. *PloS one*, 8(6), e67374.
- Glerum, J., Loyens, S. M. et Rikers, R. M. (2020). Is an online mindset intervention effective in vocational education?. *Interactive Learning Environments*, 28(7), 821-830.
- Goldstein, E.B. (2019). *Cognitive psychology, Connecting mind, research and everyday experience* (5th ed.). Wadsworth.
- Gómez, D. M. et Dartnell, P. (2019). Middle schoolers' biases and strategies in a fraction comparison task. *International Journal of Science and Mathematics Education*, 17(6), 1233-1250.
- Gómez, D. M., Jiménez, A., Bobadilla, R., Reyes, C. et Dartnell, P. (2014). The interplay between inhibitory control, general mathematics achievement and fraction comparison in middle school children. *ZDM*, 47(5), 801-811.
- Gómez, D. M., Jiménez, A., Bobadilla, R., Reyes, C. et Dartnell, P. (2015). The effect of inhibitory control on general mathematics achievement and fraction comparison in middle school children. *ZDM*, 47(5), 801-811.
- Good, C., Aronson, J. et Inzlicht, M. (2003). Improving adolescents' standardized test performance: An intervention to reduce the effects of stereotype threat. *Journal of Applied Developmental Psychology*, 24(6), 645-662.

- Good, C. D., Johnsrude, I., Ashburner, J., Henson, R. N. A., Friston, K. J. et Frackowiak, R. S. J. (2001). Cerebral asymmetry and the effects of sex and handedness on brain structure: A voxel- based morphometric analysis of 465 normal adult human brains. *NeuroImage*, 14(3), 685-700.
- Graff-Radford, J., Williams, L., Jones, D. T. et Benarroch, E. E. (2017). Caudate nucleus as a component of networks controlling behavior. *Neurology*, 89(21), 2192-2197.
- Grahn, J. A., Parkinson, J. A. et Owen, A. M. (2008). The cognitive functions of the caudate nucleus. *Progress in neurobiology*, 86(3), 141-155.
- Gunderson, E. A., Gripshover, S. J., Romero, C., Dweck, C. S., Goldin-Meadow, S. et Levine, S. C. (2013). Parent praise to 1-to 3-year-olds predicts children's motivational frameworks 5 years later. *Child development*, 84(5), 1526-1541.
- Hannula, M. S. (2003). Locating fraction on a number line. *International Group for the Psychology of Mathematics Education*, 3, 17-24.
- Harrington, G. S., Farias, D., Davis, C. H. et Buonocore, M. H. (2007). Comparison of the neural basis for imagined writing and drawing. *Human Brain Mapping*, 28(5), 450-459.
- Hartwigsen, G., Neef, N. E., Camilleri, J. A., Margulies, D. S. et Eickhoff, S. B. (2019). Functional segregation of the right inferior frontal gyrus: evidence from coactivation-based parcellation. *Cerebral Cortex*, 29(4), 1532-1546.
- Hebb, D. O. (1949). *The organization of behavior*. Wiley.
- Heyman, G. D., Dweck, C. S. et Cain, K. M. (1992). Young children's vulnerability to self-blame and helplessness: Relationship to beliefs about goodness. *Child development*, 63(2), 401-415.
- Heyman, G. D. et Dweck, C. S. (1998). Children's thinking about traits: Implications for judgments of the self and others. *Child development*, 69(2), 391-403.
- Higgins, E. T. et Rholes, W. S. (1978). "Saying is believing": Effects of message modification on memory and liking for the person described. *Journal of Experimental Social Psychology*, 14, 363-378.
- Houdé, O. (2004). *La psychologie de l'enfant*. Presses universitaires de France.
- Houdé, O. (2014). *Apprendre à résister*. Les Éditions Le Pommier.
- Houdé, O. et Borst, G. (2014). Measuring inhibitory control in children and adults: brain imaging and mental chronometry. *Frontiers in psychology*, 5, 616.
- Houdé, O. et Borst, G. (2015). Evidence for an inhibitory-control theory of the reasoning brain. *Frontiers in human neuroscience*, 9, 148.

- Houdé, O. et Leroux, G. (2009). *Psychologie du développement cognitif*. Presses universitaires de France.
- 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(6), 1486-1492.
- Houdé, O., Zago, L., Mellet, E., Moutier, S., Pineau, A., Mazoyer, B. et Tzourio-Mazoyer, N. (2000). Shifting from the perceptual brain to the logical brain: The neural impact of cognitive inhibition training. *Journal of cognitive neuroscience*, 12(5), 721-728.
- Huettel, S. A., Song, A. W. et McCarthy, G. (2008). *Functional magnetic resonance imaging*. Sinauer Associates Inc.
- Hutzler, F. (2014). Reverse inference is not a fallacy per se: Cognitive processes can be inferred from functional imaging data. *NeuroImage*, 84, 1061-1069.
- Ischebeck, A., Schocke, M. et Delazer, M. (2009). The processing and representation of fractions within the brain: An fMRI investigation. *NeuroImage*, 47(1), 403-413.
- Issaieva, E. (2013). Les conceptions de l'intelligence chez les élèves en fin du primaire en France. *Enfance*, (4), 393-413.
- Kahneman, H. (2011). *Thinking Fast and Slow*. Allen Lane.
- Kania, B. F., Wrońska, D. et Zięba, D. (2017). Introduction to Neural Plasticity Mechanism. *Journal of Behavioral and Brain Science*, 7(02), 41.
- Kennett, D. J. et Keefer, K. (2006). Impact of learned resourcefulness and theories of intelligence on academic achievement of university students: An integrated approach. *Educational Psychology*, 26(3), 441-457.
- Kool, W. et Botvinick, M. (2018). Mental labour. *Nature human behaviour*, 2(12), 899-908.
- Kraft, M. A. (2020). Interpreting effect sizes of education interventions. *Educational Researcher*, 49(4), 241-253.
- Kramer, A. W., Huizenga, H. M., Krabbendam, L. et van Duijvenvoorde, A. C. (2020). Is it worth it? How your brain decides to make an effort. *Everything You and Your Teachers Need to Know About the Learning Brain*, 34.

- Lanoë, C., Rossi, S., Froment, L. et Lubin, A. (2015). Le programme pédagogique neuroéducatif « À la découverte de mon cerveau » : quels bénéfices pour les élèves d'école élémentaire? *Approche neuropsychologique des apprentissages chez l'enfant*, 134, 55-62.
- Le, T. H., Pardo, J. V. et Hu, X. (1998). 4 T-fMRI study of nonspatial shifting of selective attention: cerebellar and parietal contributions. *Journal of neurophysiology*, 79(3), 1535-1548.
- 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. *Neuroeducation*, 2(1), 44-70.
- Li, Y. et Bates, T. (2017). *Does growth mindset improve children's IQ, educational attainment or response to setbacks? Active-control interventions and data on children's own mindsets*. Unpublished manuscript. Retrieved from SocArXiv: <https://osf.io/preprints/socarxiv/tsdwy/>
- Limeri, L. B., Choe, J., Harper, H. G., Martin, H. R., Benton, A. et Dolan, E. L. (2020). Knowledge or abilities? How undergraduates define intelligence. *CBE—Life Sciences Education*, 19(1), ar5.
- Lloret-Segura, S., Ferreres-Traver, A., Hernandez-Baeza, A. et Tomas-Marco, I. (2014). Exploratory item factor analysis: A practical guide revised and updated. *Anales de Psicología*, 30(3), 1151-1169.
- Lubin, A., Lanoë, C., Pineau, A. et Rossi, S. (2012). Apprendre à inhiber: une pédagogie innovante au service des apprentissages scolaires fondamentaux (mathématiques et orthographe) chez des élèves de 6 à 11 ans. *Neuroeducation*, 1(1), 55-84.
- Lubin, A., Vidal, J., Lanoë, C., Houdé, O. et Borst, G. (2013). Inhibitory control is needed for the resolution of arithmetic word problems: A developmental negative priming study. *Journal of Educational Psychology*, 105(3), 701-708.
- Macizo, P. (2017). Conflict resolution in two-digit number processing: evidence of an inhibitory mechanism. *Psychological research*, 81(1), 219-230.
- Macnamara, B. N. et Burgoyne, A. P. (2023). Do growth mindset interventions impact students' academic achievement? A systematic review and meta-analysis with recommendations for best practices. *Psychological Bulletin*, 149(3-4), 133.
- Maguire, E. A., Gadian, D. G., Johnsrude, I. S., Good, C. D., Ashburner, J., Frackowiak, R. S. et Frith, C. D. (2000). Navigation-related structural change in the hippocampi of taxi drivers. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 97(8), 4398-4403.
- Maldjian, J. A., Laurienti, P.J., Kraft, R. A. et Burdette, J.H. (2003). An automated method for neuroanatomic and cytoarchitectonic atlas-based interrogation of fMRI data sets. *Neuroimage*, 19(3), 1233-1239.

- Mangels, J. A., Butterfield, B., Lamb, J., Good, C. et Dweck, C. S. (2006). Why do beliefs about intelligence influence learning success? A social cognitive neuroscience model. *Social cognitive and affective neuroscience*, 1(2), 75-86.
- Majid, D. A., Cai, W., Corey-Bloom, J. et Aron, A. R. (2013). Proactive selective response suppression is implemented via the basal ganglia. *Journal of Neuroscience*, 33(33), 13259-13269.
- Masson, S. (2012). *Étude des mécanismes cérébraux liés à l'expertise en électricité à l'aide de l'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle* (Thèse de doctorat). Université du Québec à Montréal.
- Masson, S. (2020). *Activer ses neurones: pour mieux apprendre et enseigner*. Odile Jacob.
- Masson, S. et Borst, G. (2018). *Méthodes de recherche en neuroéducation*. PUQ.
- 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), 44-55.
- Matchin, W. G. (2018). A neuronal retuning hypothesis of sentence-specificity in Broca's area. *Psychonomic Bulletin & Review*, 25, 1682-1694.
- Meert, G., Grégoire, J. et Noël, M. P. (2010). Comparing the magnitude of two fractions with common components: Which representations are used by 10-and 12-year-olds? *Journal of Experimental Child Psychology*, 107(3), 244-259.
- Menon, V., Adelman, N. E., White, C. D., Glover, G. H. et Reiss, A. L. (2001). Error-related brain activation during a Go/NoGo response inhibition task. *Human brain mapping*, 12(3), 131-143.
- Messel, M. S., Raud, L., Hoff, P. K., Skaftnes, C. S. et Huster, R. J. (2019). Strategy switches in proactive inhibitory control and their association with task-general and stopping-specific networks. *Neuropsychologia*, 135, 107220.
- Miller, D. I. (2019). When do growth mindset interventions work?. *Trends in cognitive sciences*, 23(11), 910-912.
- Moser, J. S., Schroder, H. S., Heeter, C., Moran, T. P. et Lee, Y. H. (2011). Mind your errors evidence for a neural mechanism linking growth mind-set to adaptive posterror adjustments. *Psychological Science*, 22(12), 1484-1489.
- 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.

- Myers, C. A., Wang, C., Black, J. M., Bugescu, N. et Hoefft, F. (2016). The matter of motivation: Striatal resting-state connectivity is dissociable between grit and growth mindset. *Social cognitive and affective neuroscience*, *11*(10), 1521-1527.
- Ni, Y. et Zhou, Y. D. (2005). Teaching and learning fraction and rational numbers: The origins and implications of whole number bias. *Educational Psychologist*, *40*(1), 27-52.
- 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.
- Nieuwenhuis, S., Janssen, T. W., van Der Mee, D. J., Rahman, F. A., Meeter, M. et van Atteveldt, N. M. (2023). A Novel Approach to Investigate the Impact of Mindset and Physiology on the Choice to Invest Effort During an Arithmetic Task. *Mind, Brain, and Education*, *17*(2), 123-131.
- Obersteiner, A., Van Dooren, W., Van Hoof, J. et Verschaffel, L. (2013). The natural number bias and magnitude representation in fraction comparison by expert mathematicians. *Learning and Instruction*, *28*, 64-72.
- Pauli, R., Bowring, A., Reynolds, R., Chen, G., Nichols, T. E. et Maumet, C. (2016). Exploring fMRI results space: 31 variants of an fMRI analysis in AFNI, FSL, and SPM. *Frontiers in neuroinformatics*, *10*, 24.
- Pas, P., Van den Munkhof, H. E., Du Plessis, S. et Vink, M. (2017). Striatal activity during reactive inhibition is related to the expectation of stop-signals. *Neuroscience*, *361*, 192-198.
- Passolunghi, M. C. et Siegel, L. S. (2004). Working memory and access to numerical information in children with disability in mathematics. *Journal of Experimental Child Psychology*, *88*(4), 348–367.
- Passolunghi, M. C. et Siegel, L. S. (2001). Short term memory, working memory, and inhibitory control in children with specific arithmetic learning disabilities. *Journal of Experimental Child Psychology*, *80*, 44– 57.
- Peterson, B. S., Kane, M. J., Alexander, G. M., Lacadie, C., Skudlarski, P., Leung, H. C., ... Gore, J. C. (2002). An event-related functional MRI study comparing interference effects in the Simon and Stroop tasks. *Cognitive Brain Research*, *13*(3), 427-440.
- Poldrack, R. A. (2006). Can cognitive processes be inferred from neuroimaging data?. *Trends in cognitive sciences*, *10*(2), 59-63.
- Poldrack, R. A., Mumford, J. A. et Nichols, T. E. (2011). *Handbook of functional MRI data analysis*. Cambridge University Press.
- Potvin, P., Masson, S., Lafortune, S. et Cyr, G. (2015). 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*, *13*(1), 21-43.

- Pressley, M., McDaniel, M. A., Turnure, J. E., Wood, E. et Ahmad, M. (1987). Generation and precision of elaboration: Effects on intentional and incidental learning. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 13(2), 291.
- Rattan, A., Good, C. et Dweck, C. S. (2012). “It's ok—Not everyone can be good at math”: Instructors with an entity theory comfort (and demotivate) students. *Journal of Experimental Social Psychology*, 48(3), 731-737.
- Reeve, J. (2018). *Understanding Motivation and Emotion* (7th ed.). Wiley
- Rickard, T.C., Romero, S.G., Basso, G., Wharton, C., Flitman, S. et Grafman, J. (2000). The calculating brain, an fMRI study. *Neuropsychologia* 38, 325–335.
- Riopel, M. et McMullin, S. O. (2021). Effets d’espace et de répétition en contexte scolaire. *Neuroéducation*, 7(1), 13-19.
- Roell, M., Viarouge, A., Houdé, O. et Borst, G. (2017). Inhibitory control and decimal number comparison in school-aged children. *PloS one*, 12(11), e0188276.
- Rossi, S., Vidal, J., Letang, M. Houdé, O. et Borst, G. (2019). Adolescents and adults need inhibitory control to compare fractions. *Journal of Numerical Cognition*, 5(3), 314-336.
- Rubia, K., Smith, A. B., Woolley, J., Nosarti, C., Heyman, I., Taylor, E. et Brammer, M. (2006). Progressive increase of frontostriatal brain activation from childhood to adulthood during event-related tasks of cognitive control. *Human brain mapping*, 27(12), 973-993.
- Schmidt, C. C., Timpert, D. C., Arend, I., Vossel, S., Fink, G. R., Henik, A. et Weiss, P. H. (2020). Control of response interference: caudate nucleus contributes to selective inhibition. *Scientific reports*, 10(1), 20977.
- Schroder, H. S., Fisher, M. E., Lin, Y., Lo, S. L., Danovitch, J. H. et Moser, J. S. (2017). Neural evidence for enhanced attention to mistakes among school-aged children with a growth mindset. *Developmental Cognitive Neuroscience*, 24, 42-50.
- Schroder, H. S., Moran, T. P., Donnellan, M. B. et Moser, J. S. (2014). Mindset induction effects on cognitive control: A neurobehavioral investigation. *Biological psychology*, 103, 27-37.
- Sebastian, A., Pohl, M. F., Klöppel, S., Feige, B., Lange, T., Stahl, C., ... Tüscher, O. (2013). Disentangling common and specific neural subprocesses of response inhibition. *Neuroimage*, 64, 601-615.
- Shtulman, A. et Valcarcel, J. (2012). Scientific knowledge suppresses but does not supplant earlier intuitions. *Cognition*, 124(2), 209-215.
<https://doi.org/10.1016/j.cognition.2012.04.005>
- Siegler, R. S. (1999). Strategic development. *Trends in Cognitive Sciences*, 3(11), 430-435.

- Siegler, R. S., Fazio, L. K., Bailey, D. H. et Zhou, X. (2013). Fractions: The new frontier for theories of numerical development. *Trends in Cognitive Sciences*, 17, 13-19.
- Sisk, V. F., Burgoyne, A. P., Sun, J., Butler, J. L. et Macnamara, B. N. (2018). To what extent and under which circumstances are growth mind-sets important to academic achievement? Two meta-analyses. *Psychological science*, 29(4), 549-571.
- Smith, S.M. (2004). Overview of fMRI analysis, *The British Journal of Radiology*, 77, S167-S175.
- Smittenaar, P., Guitart-Masip, M., Lutti, A. et Dolan, R. J. (2013). Preparing for selective inhibition within frontostriatal loops. *Journal of Neuroscience*, 33(46), 18087-18097.
- Sriram, R. (2014). Rethinking intelligence: The role of mindset in promoting success for academically high-risk students. *Journal of College Student Retention: Research, Theory & Practice*, 15(4), 515-536.
- St Clair-Thompson, H. L. et Gathercole, S. E. (2006). Executive functions and achievements in school: Shifting, updating, inhibition, and working memory. *The quarterly journal of experimental psychology*, 59(4), 745-759.
- Stevens, J. P. (2009). *Applied Multivariate Statistics for the Social Sciences* (5th ed.). Routledge.
- Stipek, D. et Gralinski, J. H. (1996). Children's beliefs about intelligence and school performance. *Journal of Educational Psychology*, 88(3), 397.
- Stroop, J. R. (1935). Stroop color word test. *Journal of Experimental Psychology*, (18), 643-662.
- Swick, D., Ashley, V. et Turken, A. U. (2008). Left inferior frontal gyrus is critical for response inhibition. *BMC Neuroscience*, 9(1), 102.
- Talairach, J. et Tournoux, P. (1988a). Co-planar stereotaxic atlas of the human brain, 1988. *Theime, Stuttgart, Germany*, 270, 132.
- Trautwein, U., Marsh, H. W., Nagengast, B., Lüdtke, O., Nagy, G. et Jonkmann, K. (2012). Probing for the multiplicative term in modern expectancy-value theory: A latent interaction modeling study. *Journal of Educational Psychology*, 104, 763-777.
- Vamvakoussi, X. (2015). The development of rational number knowledge: Old topic, new insights. *Learning and Instruction*, 37, 50-55.
- Vamvakoussi, X., Van Dooren, W. et Verschaffel, L. (2012). Naturally biased? In search for reaction time evidence for a natural number bias in adults. *The Journal of Mathematical Behavior*, 31(3), 344-355.
- van den Wildenberg, W. P. M. et van der Molen, M. W. (2004). Developmental trends in simple and selective inhibition of compatible and incompatible responses. *Journal of Experimental Child Psychology*, 87(3), 201-220.

- Van de Walle, J. A., Patry, M., Lovin, L. H. et Kazadi, C. (2008). *L'enseignement des mathématiques: l'élève au centre de son apprentissage: deuxième année du deuxième cycle et troisième cycle du primaire: de la quatrième à la sixième année*. ERPI.
- Van Hoof, J., Degrande, T., Ceulemans, E., Verschaffel, L. et Van Dooren, W. (2018). Towards a mathematically more correct understanding of rational numbers: A longitudinal study with upper elementary school learners. *Learning and Individual Differences*, 61, 99-108.
- Van Hoof, J., Lijnen, T., Verschaffel, L. et Van Dooren, W. (2013). Are secondary school students still hampered by the natural number bias? A reaction time study on fraction comparison tasks. *Research in Mathematics Education*, 15(2), 154-164.
- Van Hoof, J., Verschaffel, L., De Neys, W. et Van Dooren, W. (2020). Intuitive errors in learners' fraction understanding: A dual-process perspective on the natural number bias. *Memory & Cognition*, 48, 1171-1180.
- Vestergren, P. et Nyberg, L. (2014). Testing alters brain activity during subsequent restudy: Evidence for test-potentiated encoding. *Trends in Neuroscience and Education*, 3(2), 69-80.
- Vezeau, C., Bouffard, T. et Dubois, V. (2004). Relation entre la conception de l'intelligence et les buts d'apprentissage. *Revue des sciences de l'éducation*, 30(1), 9-25.
- Vidal, J., Mills, T., Pang, E. W. et Taylor, M. J. (2012). Response inhibition in adults and teenagers: Spatiotemporal differences in the prefrontal cortex. *Brain and Cognition*, 79(1), 49-59.
- Viggiano, M. P. (1999). Measures of performance. In G. Denes et L. Pizzamiglio (Eds.), *Handbook of clinical and experimental neuropsychology*. Psychology Press.
- Vink, M., Kaldewaij, R., Zandbelt, B. B., Pas, P. et du Plessis, S. (2015). The role of stop-signal probability and expectation in proactive inhibition. *European Journal of Neuroscience*, 41(8), 1086-1094.
- Vosniadou, S. et Verschaffel, L. (2004). Extending the conceptual change approach to mathematics learning and teaching. Dans L. Verschaffel et S. Vosniadou (Eds.), *Conceptual change in mathematics learning and teaching. Special Issue of Learning and Instruction*, 14(5), 445-451.
- Walton, G. M. et Yeager, D. S. (2020). Seed and soil: Psychological affordances in contexts help to explain where wise interventions succeed or fail. *Current Directions in Psychological Science*, 29(3), 219–226.
- Wandersee, J.H., Mintzes, J.J. et Novak, J.D. (1994). Research on alternative conceptions in science. *Handbook of research on science teaching and learning*, 177, 210.

- Wang, S., Dai, J., Li, J., Wang, X., Chen, T., Yang, X., ... Gong, Q. (2018). Neuroanatomical correlates of grit: Growth mindset mediates the association between gray matter structure and trait grit in late adolescence. *Human Brain Mapping, 39*(4), 1688-1699.
- Ward, J. (2010). *The student's guide to cognitive neuroscience: Second edition*. Psychology Press.
- Weiner, B. (2000). Intrapersonal and interpersonal theories of motivation from an attributional perspective. *Educational Psychology Review, 12*(1), 1-14.
- Wigfield, A. et Eccles, J. S. (2000). Expectancy–value theory of achievement motivation. *Contemporary educational psychology, 25*(1), 68-81.
- Wilkey, E. D. et Price, G. R. (2019). Attention to number: The convergence of numerical magnitude processing, attention, and mathematics in the inferior frontal gyrus. *Human brain mapping, 40*(3), 928-943.
- Wortha, S. M., Bloechle, J., Ninaus, M., Kiili, K., Lindstedt, A., Bahnmüller, J., ... Klein, E. (2020). Neurofunctional plasticity in fraction learning: An fMRI training study. *Trends in Neuroscience and Education, 21*, 100141.
- Yeager, D. S., Carroll, J. M., Buontempo, J., Cimpian, A., Woody, S., Crosnoe, R., ... Dweck, C. S. (2022). Teacher mindsets help explain where a growth-mindset intervention does and doesn't work. *Psychological Science, 33*(1), 18-32.
- Yeager, D. S., Hanselman, P., Walton, G. M., Murray, J. S., Crosnoe, R., Muller, C., ... Dweck, C. S. (2019). A national experiment reveals where a growth mindset improves achievement. *Nature, 573*(7774), 364-369.
- Yeager, D. S., Romero, C., Paunesku, D., Hulleman, C. S., Schneider, B., Hinojosa, C., ... Trott, J. (2016). Using design thinking to improve psychological interventions: The case of the growth mindset during the transition to high school. *Journal of educational psychology, 108*(3), 374-391.
- Zhang, J., Kuusisto, E. et Tirri, K. (2017). How teachers' and students' mindsets in learning have been studied: research findings on mindset and academic achievement. *Psychology, 8*(9), 1363–1377.