

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL

COMPARAISON DE L'ACTIVITÉ CÉRÉBRALE ET DU TEMPS DE RÉACTION
DE NOVICES EN ÉLECTRICITÉ AVANT ET APRÈS AVOIR SURMONTÉ UNE
CONCEPTION ALTERNATIVE FRÉQUENTE CONCERNANT LES CIRCUITS
ÉLECTRIQUES SIMPLES

MÉMOIRE

PRÉSENTÉ

COMME EXIGENCE PARTIELLE

DE LA MAÎTRISE EN ÉDUCATION

PAR

LUCIAN NENCIOVICI

FÉVRIER 2018

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL
Service des bibliothèques

Avertissement

La diffusion de ce mémoire se fait dans le respect des droits de son auteur, qui a signé le formulaire *Autorisation de reproduire et de diffuser un travail de recherche de cycles supérieurs* (SDU-522 – Rév.10-2015). Cette autorisation stipule que «conformément à l'article 11 du Règlement no 8 des études de cycles supérieurs, [l'auteur] concède à l'Université du Québec à Montréal une licence non exclusive d'utilisation et de publication de la totalité ou d'une partie importante de [son] travail de recherche pour des fins pédagogiques et non commerciales. Plus précisément, [l'auteur] autorise l'Université du Québec à Montréal à reproduire, diffuser, prêter, distribuer ou vendre des copies de [son] travail de recherche à des fins non commerciales sur quelque support que ce soit, y compris l'Internet. Cette licence et cette autorisation n'entraînent pas une renonciation de [la] part [de l'auteur] à [ses] droits moraux ni à [ses] droits de propriété intellectuelle. Sauf entente contraire, [l'auteur] conserve la liberté de diffuser et de commercialiser ou non ce travail dont [il] possède un exemplaire.»

REMERCIEMENTS

Le présent mémoire a été rendu possible grâce au travail remarquable réalisé par des membres de mon équipe de recherche, et ce, bien avant que je songe même à entamer des études de maîtrise. Les lignes qui suivent serviront donc à exprimer ma gratitude et mon admiration envers ces personnes. Ainsi, j'aimerais en premier lieu remercier sincèrement mon directeur de mémoire, Monsieur Steve Masson. M. Masson est professeur au Département de didactique de l'Université du Québec à Montréal (UQAM). Il est également l'auteur de la première thèse doctorale au Québec ayant utilisé l'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle (IRMf) pour étudier l'apprentissage de notions scolaires. Il peut donc être considéré comme un pionnier de ce champ de recherche au Québec. Dès notre première rencontre, le professeur Masson a été en mesure de m'intégrer à un projet stimulant, novateur et correspondant à mes champs d'intérêt en recherche. Au fil du temps, M. Masson s'est révélé être un professeur non seulement d'une grande compétence dans le champ des neurosciences éducationnelles, mais aussi d'une rigueur intellectuelle hors pair. Ce sont son encadrement exemplaire, sa grande disponibilité et ses précieux conseils qui ont grandement contribué à la finalisation du présent mémoire.

Dans la même veine, je tiens à adresser de sincères remerciements à MM. Patrice Potvin, Martin Riopel, Patrick Charland et Pierre Chastenay, tous professeurs au Département de didactique de l'UQAM. Leurs commentaires ponctuels, à différents moments-clés au cours de la réalisation du présent projet, m'ont permis de le bonifier petit à petit, par exemple au moyen de la considération de nouvelles perspectives théoriques que je n'avais pas envisagées au départ.

Puis, je me dois aussi d'adresser des remerciements à deux étudiantes au doctorat en éducation, soit Mmes Lorie-Marlène Brault Foisy et Geneviève Allaire-Duquette. Ces deux doctorantes, tout comme M. Masson, m'ont fourni un encadrement irréprochable au cours de la réalisation du présent projet, tout particulièrement en ce qui touche l'analyse des données empiriques. En effet, compte tenu de la complexité de l'analyse des données collectées par neuroimagerie, le présent mémoire n'aurait pas pu voir le jour sans l'aide précieuse de ces deux étudiantes.

DÉDICACE

Aux grands cerveaux ayant contribué
à façonner le monde contemporain

AVANT-PROPOS

Le choix du sujet étudié dans le présent mémoire est généralement motivé par deux facteurs. Le premier facteur, pouvant aussi être considéré comme le but général de la présente étude, est la volonté à contribuer à la production de nouvelles connaissances scientifiques dans le champ de la didactique des sciences et, conséquemment, à une amélioration potentielle des pratiques pédagogiques employées dans les classes de sciences. Le deuxième est l'intérêt de l'auteur envers le courant de recherche neuroscientifique en éducation, courant aussi appelé *neurosciences éducationnelles*, *neuroéducation* ou *neuropédagogie*. L'étude décrite dans le présent mémoire n'a pas, à proprement parler, examiné les effets d'une intervention pédagogique sur l'apprentissage des sciences et ne prétend aucunement « révolutionner » les pratiques pédagogiques utilisées dans les classes de sciences, mais l'auteur souhaite néanmoins que les résultats présentés et discutés dans le présent mémoire puissent contribuer à un avancement modeste, mais concret, des connaissances scientifiques concernant l'apprentissage de concepts difficiles en sciences.

TABLE DES MATIÈRES

LISTE DES FIGURES.....	x
LISTE DES TABLEAUX.....	xii
RÉSUMÉ	xii
ABSTRACT	xii
INTRODUCTION	1
CHAPITRE I PROBLÉMATIQUE.....	4
1.1 État et importance de la compétence scientifique.....	5
1.2 Facteurs associés aux difficultés académiques en sciences	8
1.3 Conceptions alternatives en sciences	9
1.3.1 Conceptions alternatives à travers les niveaux d'aptitude scolaire.....	11
1.3.2 Conceptions alternatives à travers les cultures.....	12
1.4 Causes possibles de la genèse de conceptions alternatives.....	13
1.5 Changement conceptuel en sciences	15
1.5.1 Bref historique du changement conceptuel.....	16
1.5.2 Dissension parmi les modèles de changement conceptuel.....	18
1.6 Études psycho-cognitivistes sur le changement conceptuel en sciences	25
1.7 Études neuroscientifiques sur le changement conceptuel en sciences.....	27
1.8 Positionnement de la présente étude, angle nouveau de traitement et question générale de recherche.....	30

1.9 Pertinence scientifique et sociale	31
CHAPITRE II CADRE THÉORIQUE	34
2.1 Notion de <i>conception alternative</i> en didactique des sciences	35
2.1.1 Terme <i>conception alternative</i> parmi une pléthore de termes	35
2.1.2 Sens du terme <i>conception alternative</i>	37
2.1.3 Conceptions alternatives en physique électrique	43
2.2 Notion de <i>changement conceptuel</i> en didactique des sciences	47
2.2.1 Sens du terme <i>changement conceptuel</i>	47
2.2.2 Changement conceptuel dans une épistémologie constructiviste	49
2.2.3 Différents modèles de changement conceptuel	52
2.3 Mécanisme de contrôle inhibiteur	66
2.3.1 <i>Contrôle inhibiteur</i> et son sens	66
2.3.2 Régions cérébrales associées au contrôle inhibiteur	68
2.3.3 Contrôle inhibiteur dans le changement conceptuel en sciences	76
2.4 Hypothèses de recherche	91
CHAPITRE III MÉTHODOLOGIE	94
3.1 Participants et critères de sélection	94
3.2 Recrutement des participants et consentement	96
3.3 Types de données et instrument de mesure	97
3.4 Tâche et stimuli	101
3.5 Procédure et paramètres d'acquisition des images	104
3.5.1 Présentation des consignes et tâche de pratique	104
3.5.2 Acquisition des données cérébrales	104

3.6 Analyse des données	107
3.6.1 Analyse des données comportementales.....	107
3.6.2 Prétraitement des données cérébrales.....	108
3.6.3 Analyse des données cérébrales à l'aide du modèle linéaire général.....	113
3.7 Considérations éthiques	128
CHAPITRE IV RÉSULTATS	130
4.1 Résultats au niveau comportemental.....	130
4.2 Résultats au niveau cérébral.....	133
4.2.1 Résultats de l'analyse portant sur la totalité du cerveau	133
4.2.2 Résultats de l'analyse portant sur les régions d'intérêt.....	135
CHAPITRE V DISCUSSION.....	138
5.1 Validation des hypothèses de recherche	138
5.1.1 Hypothèse H ₁	138
5.1.2 Hypothèse H ₂	139
5.1.3 Hypothèse H ₃	140
5.2 Interprétation des activations cérébrales observées	143
5.2.1 Mémoire épisodique.....	143
5.2.2 Interprétation des activations cérébrales observées en rapport avec la récupération en mémoire épisodique	146
5.3 Liens avec des modèles de changement conceptuel et la <i>séquence longitudinale</i>	175
5.4 Limites de la présente étude	185
5.4.1 Manque de suivi longitudinal.....	185

5.4.2 Type de participants utilisés.....	187
5.4.3 Nature non pédagogique de l'intervention.....	188
5.4.4 Technique de définition des ROI	190
CHAPITRE VI CONCLUSION	193
APPENDICE A QUESTIONNAIRE ADMINISTRÉ AVANT LA SÉANCE DE NEUROIMAGERIE	201
APPENDICE B FORMULAIRE DE CONSENTEMENT	206
RÉFÉRENCES.....	216

LISTE DES FIGURES

Figure		Page
Figure 1.1	Illustration de l'inférence « vers l'avant ».....	29
Figure 2.1	Représentation schématisée du modèle de l'unipôle.....	45
Figure 3.1	Appareil d'IRMf utilisé dans la présente étude.....	101
Figure 3.2	Types de stimuli utilisés dans la tâche.....	103
Figure 3.3	Séquence de stimuli utilisée dans la tâche.....	103
Figure 3.4	Stimuli utilisés pour l'intervention.....	107
Figure 3.5	Étapes de prétraitement et d'analyse des données cérébrales.....	109
Figure 4.1	Régions cérébrales significativement plus activées au posttest, comparativement au prétest, lors de l'évaluation des stimuli naïfs	137

LISTE DES TABLEAUX

Tableau		Page
Tableau 3.1	Caractéristiques de l'échantillon final.....	97
Tableau 3.2	Paramètres liés à l'acquisition des images.....	110
Tableau 3.3	Coordonnées des pics d'activation les plus fortement associés au mécanisme de contrôle inhibiteur lors de l'exécution de la tâche du Go/No-go dans cinq méta-analyses.....	125
Tableau 3.4	Coordonnées des pics d'activation les plus fortement associés au mécanisme de récupération en mémoire lors de l'exécution de tâches de récupération de stimuli dans quatre méta-analyses.....	128
Tableau 4.1	Moyennes (M) et écarts-types (SD) du taux d'exactitude (sur 1) et du temps de réaction (en s) des participants au prétest et au posttest en fonction du type de stimuli évalués et valeurs <i>t</i> de la comparaison statistique entre le prétest et le posttest	131
Tableau 4.2	Régions cérébrales significativement plus activées au posttest comparativement au prétest en fonction du type de stimuli évalués et valeurs <i>t</i> de la comparaison statistique.....	136

RÉSUMÉ

Les difficultés éprouvées par les élèves dans l'apprentissage de concepts scientifiques contre-intuitifs proviennent fréquemment des conceptions alternatives qu'ils possèdent. Le processus d'apprentissage de concepts scientifiques contre-intuitifs se nomme *changement conceptuel* et n'est pas encore bien compris, notamment concernant les mécanismes cognitifs impliqués. Des études récentes ont montré que, pour répondre scientifiquement à des questions impliquant des conceptions alternatives, des experts en sciences présumés avoir complété un changement conceptuel activaient principalement deux mécanismes : (1) le *contrôle inhibiteur*, qui consiste à inhiber les conceptions alternatives, toujours présentes dans leur pensée, pour surmonter ainsi leur tendance à fournir des réponses erronées correspondant à ces conceptions, et (2) la *récupération en mémoire*, qui consiste à récupérer le concept scientifique. Toutefois, les mécanismes mobilisés par des novices afin de surmonter leurs conceptions alternatives sont beaucoup moins connus. Dans cette étude, un groupe de novices en électricité ($N = 22$) ont répondu à un test en électricité avant et après avoir surmonté une conception alternative fréquente concernant les circuits électriques simples. Le temps de réaction et l'activité cérébrale ont été mesurés en utilisant l'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle (IRMf). Les hypothèses étaient à l'effet que, pour surmonter la conception alternative, les novices mobiliseraient les deux mêmes mécanismes que les experts. Les résultats montrent que, après avoir surmonté la conception alternative comparativement à avant, le temps de réaction des novices était plus court et ils présentaient des activations dans les aires rostrofrontales et pariétales. Ces résultats suggèrent l'activation d'un mécanisme de récupération en mémoire épisodique, mais pas d'inhibition. Cela suggère aussi que l'apprentissage de concepts scientifiques contre-intuitifs implique davantage que la simple correction d'une réponse erronée. La mobilisation de la récupération en mémoire épisodique dans les stades précoces du changement conceptuel est compatible avec certains modèles de changement conceptuel, comme le modèle d'Ohlsson qui postule que les contenus emmagasinés dans cette mémoire peuvent agir comme des unités de savoir contribuant ultérieurement à la formation de concepts. Deux des limites de cette étude sont le manque de suivi longitudinal du processus de changement conceptuel et le type d'intervention mis en place, qui restreint l'inférence d'implications pédagogiques.

Mots-clés : Apprentissage des sciences; Neuroéducation; Conceptions alternatives; Changement conceptuel; Inhibition; Récupération en mémoire; IRMf

ABSTRACT

Difficulties in learning concepts in science often stem from learners' alternative conceptions, which are strongly held and persistent. Learning pathways from alternative conceptions to counterintuitive scientific concepts is called "conceptual change" - a process not yet fully understood, notably with respect to the cognitive mechanisms involved. Recent studies showed that, to provide scientific answers to questions underlying alternative conceptions, experts in science who are presumed to have completed a conceptual change activate mainly two mechanisms. The first mechanism is *inhibitory control*, which consists of inhibiting the alternative conceptions, still present in their mind, and thus overcome the appealing, although wrong answers that correspond to these conceptions. The second mechanism is *memory retrieval*, which consists of retrieving the scientific concept. However, much less is known about the mechanisms mobilized by novices in science when they overcome an alternative conception. In the present study, novices in electricity ($N = 22$) were asked to answer to an electricity test at two moments, namely before and after they overcame a common alternative conception about simple electric circuits. Reaction time and cerebral activity were measured at both moments using functional magnetic resonance imaging (fMRI). Hypotheses were that, to overcome the alternative conception, novices would mobilize the two same cerebral mechanisms as experts. Findings show that, after overcoming their misconception, novices' reaction times are shorter and they activate rostrofrontal and parietal brain areas, suggesting a mechanism of episodic memory retrieval, but no inhibition. These results put forward the fact that learning of counterintuitive science concepts probably implies more than the simple correction of an erroneous answer. Involvement of episodic memory retrieval in early stages of conceptual change is consistent with some conceptual change models, such as Ohlsson's model, which theorizes that episodic memories can act as knowledge units that later combine to form concepts. Two of the main limits of the present study are the lack of a longitudinal follow-up of the conceptual change process and the type of intervention used, which restricts inference of pedagogical implications.

Keywords : Science learning; Neuroeducation; Misconceptions; Conceptual change; Inhibition; Memory retrieval; fMRI

INTRODUCTION

L'étude dont il est question dans le présent mémoire s'intéresse à un problème éducatif substantiellement documenté par la recherche au cours des quarante dernières années, soit les *conceptions alternatives* auxquelles adhèrent les apprenants des sciences. Ces conceptions sont des idées naïves par rapport aux phénomènes naturels, qui sont au moins partiellement en contradiction avec les idées scientifiquement admises (Treagust et Duit, 2008) et interfèrent fortement avec l'apprentissage des concepts scientifiques (Stavy et Babai, 2010). Cette problématique, connue depuis les années 1970, a engendré dans les années 1980 la naissance d'un champ de recherche nommé le *changement conceptuel*. Le changement conceptuel est le processus d'apprentissage de concepts scientifiques pour lesquels les apprenants entretiennent initialement des conceptions alternatives (Duit, 1999). Bien qu'une quantité abondante de littérature scientifique ait examiné le changement conceptuel, il n'existe pas, à ce jour, de consensus en ce qui a trait aux mécanismes par lesquels les apprenants des sciences réalisent un changement conceptuel (diSessa, 2013, 2017; Rusanen, 2014). Ce mémoire propose d'apporter de nouvelles connaissances sur ces mécanismes en utilisant une approche de recherche relativement nouvelle en éducation, soit l'approche neuroéducative.

En effet, au cours de la dernière quinzaine d'années, il a été possible d'assister à l'émergence d'une nouvelle approche dans la recherche en éducation, soit l'approche neuroéducative (Battro *et al.*, 2008; Fischer, 2009; Geake, 2004; OCDE, 2002). Cette approche, à la croisée des neurosciences, de la psychologie cognitive et de l'éducation, porte plusieurs autres dénominations relativement synonymes dans la littérature scientifique. Des exemples de ces dénominations sont *neurosciences*

éducationnelles (Pettito et Dunbar, 2004), *neuropédagogie* (Houdé, 2006, 2007) ou « *mind, brain and education* » (Fischer, 2009). Les buts généraux poursuivis par les études utilisant une approche neuroéducative est de mieux comprendre les processus ou mécanismes cérébraux impliqués dans l'apprentissage des différentes disciplines scolaires et, également, de mieux comprendre comment une meilleure connaissance de ces mécanismes peut contribuer à l'amélioration des stratégies d'enseignement et d'apprentissage et ainsi résoudre certaines problématiques éducatives observées en salle de classe (Masson, 2012; The Royal Society, 2011).

Deux études récentes ayant utilisé une approche neuroéducative (Brault Foisy *et al.*, 2015; Masson *et al.*, 2014) ont permis d'apporter de nouvelles connaissances à ce débat. Ces études ont déterminé que les mécanismes cognitifs de contrôle inhibiteur et de récupération en mémoire étaient mobilisés par des experts en sciences, présumés avoir déjà complété un changement conceptuel, pour surmonter leurs conceptions alternatives et répondre scientifiquement à des questions en sciences. Cependant, les mécanismes cognitifs mobilisés par des apprenants novices en sciences, constituant la majorité d'apprenants sur les bancs des écoles, afin de surmonter des conceptions alternatives demeurent considérablement moins bien connus. L'objectif général de la présente étude consiste donc à aider à combler ce manque de connaissances en examinant les mécanismes cognitifs mobilisés par des novices en sciences afin de surmonter leurs conceptions alternatives. Pour atteindre cet objectif, cette étude compare l'activité cérébrale et le temps de réaction d'un groupe de novices en sciences avant et après qu'ils aient surmonté une conception alternative fréquente en électricité.

Le présent mémoire est constitué de six chapitres. Le premier chapitre décrit avec plus de détails la problématique résumée dans les deux paragraphes précédents et aide à mieux comprendre le problème et la pertinence de s'y intéresser. Le deuxième chapitre définit les concepts essentiels dans le cadre de cette étude, décrit les

perspectives théoriques rattachées et résume la littérature pertinente afin de poser les hypothèses de recherche. Le troisième chapitre présente la méthodologie employée pour atteindre l'objectif général mentionné ci-dessus. Le quatrième chapitre présente les résultats obtenus au niveau comportemental et cérébral. Le cinquième chapitre traite de l'interprétation et de la discussion de ces résultats en lien avec les hypothèses posées, ainsi qu'avec les études et théories antérieures. Le sixième et dernier chapitre résume les principaux résultats et éléments de discussion, souligne les limites de la présente étude et offre certaines pistes pour des études futures.

CHAPITRE I

PROBLÉMATIQUE

Ce premier chapitre a comme buts principaux d'exposer le problème ayant justifié de mener la présente étude et de poser la question générale de recherche. Pour ce faire, le chapitre sera divisé en plusieurs sections. Dans la première section, un bref portrait sera dressé concernant l'état de la compétence scientifique des élèves à l'échelle mondiale, et au Québec en particulier, afin de faire ressortir que des difficultés sont effectivement éprouvées par les élèves en sciences. Dans la deuxième section, les facteurs associés dans la littérature scientifique à ces difficultés seront énumérés. La troisième section décrira avec plus de précision l'un de ces facteurs, qui est le facteur d'intérêt du présent mémoire, soit les *conceptions alternatives* des apprenants en sciences. La quatrième section traitera des causes possibles de genèse des conceptions alternatives. La cinquième section servira à introduire de façon générale le champ de recherche sur le *changement conceptuel* en sciences, champ qui a vu le jour principalement à cause du défi posé par les conceptions alternatives lors de l'apprentissage formel des sciences. Les sixième et septième sections décriront avec plus de précision les principaux apports de deux approches de recherche sur le changement conceptuel, soit respectivement les approches psycho-cognitiviste et neuroéducative. Ces deux sections établiront les bases de la huitième section, qui consistera à positionner la présente étude dans une approche neuroéducative et à poser la question générale de recherche. Enfin, la neuvième et dernière section

complètera la problématique en brossant un portrait de la pertinence scientifique et sociale de mener la présente étude.

1.1 État et importance de la compétence scientifique

Les tests internationaux ont démontré régulièrement qu'une proportion considérable d'élèves n'atteint pas un niveau de compétence de base en sciences. Par exemple, le *Trends in International Mathematics and Science Study* (TIMSS) est un test international qui mesure la compétence scientifique au moyen de trois sous-échelles qui correspondent à trois domaines cognitifs, soit (1) la connaissance (« knowing »), (2) l'application de la connaissance (« applying ») et (3) le raisonnement scientifique (« reasoning ») (Martin, Mullis, Foy et Stanco, 2012, p. 27-28). Ainsi, dans le test TIMSS administré en 2011, un pourcentage médian de 21 % d'élèves de la 8^e année a performé en-deçà du seuil de compétence appelé « Low International Benchmark level ». Ce résultat signifie que ces élèves ne possédaient pas un niveau de compétence scientifique pouvant être qualifié d'élémentaire (Martin *et al.*, 2012; Mullis, Martin, Foy et Arora, 2012). Similairement, le test *Program for International Student Assessment* (PISA) est un test international qui mesure également la compétence scientifique au moyen de trois sous-échelles qui correspondent (1) aux connaissances sur le contenu des sciences, (2) aux connaissances sur les procédures en sciences et (3) aux connaissances épistémiques en sciences (Organisation de coopération et de développement économique [OCDE], 2015, p. 9). Ainsi, selon le test PISA administré en 2012, un pourcentage global de 18 % d'élèves de 15 ans a performé en dessous du niveau 2 (OCDE, 2014). Or, ce niveau est considéré comme le niveau-seuil de compétence scientifique permettant une participation active dans les situations quotidiennes impliquant les sciences (OCDE, 2007b, 2014). De telles situations sont, notamment, l'utilisation ou l'achat d'appareils électriques ainsi que la compréhension critique de messages médiatiques (p. ex. : publicités, nouvelles). Il est

ainsi estimé que les élèves performant en-deçà du niveau 2 possèdent un niveau de compétence scientifique si limité qu'il ne peut être appliqué qu'à un nombre relativement restreint de situations familières. Plus récemment, le test PISA administré en 2015 a révélé que le pourcentage global d'élèves performant en-deçà du niveau 2 a augmenté à 21 % (OCDE, 2015), ce qui signifie qu'un peu plus d'un élève sur cinq, à l'échelle mondiale, ne possède probablement pas un niveau de compétence scientifique de base.

Quant au Canada, ce même pourcentage est moins élevé et est demeuré plutôt stable, s'élevant, respectivement, à 10 % en 2012 et à 11 % en 2015. Enfin, en ce qui touche le cas précis du Québec, le pourcentage d'élèves de 15 ans n'atteignant pas le niveau 2 du test PISA s'élevait, respectivement, à 10,6 % en 2012 et à un peu plus de 8 % en 2015 (OCDE, 2015). Ainsi, malgré le fait que la performance des élèves canadiens et, à plus forte raison celle des élèves québécois, soient supérieures à la moyenne des pays de l'OCDE, ces pourcentages suggèrent qu'approximativement un élève de 15 ans sur dix, autant à l'échelle canadienne que québécoise, ne semble pas atteindre un niveau de compétence scientifique pouvant être qualifié de base. Dans la même veine, au Québec, les taux de réussite¹ en juin 2012 aux épreuves théoriques ministérielles des programmes *Science et technologie* et *Applications scientifiques et technologiques*, administrées aux finissants de la 4^e secondaire, étaient respectivement de 62,0 % et de 47,4 % dans le secteur public, alors que, dans le secteur privé, ces deux mêmes taux de réussite se situaient respectivement à 89,1 % et à 79,2 % (Ministère de l'éducation, du loisir et du sport [MELS], 2012). En juin 2015, ces deux mêmes taux de réussite dans le secteur public étaient respectivement de 64,4 % et de 57,8 %, alors que, dans le secteur privé, ils se situaient respectivement à 87,0 % et à 86,9 % (MELS, 2015). Considérant que, dans les

¹ Le seuil de réussite aux épreuves théoriques ministérielles est fixé à 60 %.

dernières années, un pourcentage stable d'approximativement 80 % d'élèves du secondaire fréquentaient l'école publique au Québec (Statistique Canada, 2015), il est possible d'évaluer que, autant en 2012 qu'en 2015, environ 30 % d'élèves québécois de 4^e secondaire échouaient à l'épreuve finale du programme *Science et technologie*. En ce qui a trait à l'épreuve finale du programme *Applications scientifiques et technologiques*, la même évaluation permet d'établir un taux d'échec d'environ 40 %.

Ces proportions considérables de jeunes en fin de parcours secondaire n'ayant pas acquis un niveau de compétence scientifique de base sont inquiétantes pour au moins deux motifs. Premièrement, dans le contexte mondial actuel de complexification et de diffusion accrue des savoirs scientifiques, il est primordial pour la compétitivité économique de tous les pays de posséder une main-d'œuvre qualifiée dans les domaines scientifique, technologique et du génie (United Nations Educational Scientific and Cultural Organisation [UNESCO], 2010). Deuxièmement, un désintérêt des jeunes à poursuivre une carrière scientifique a été constaté dans quantité de pays au cours de la dernière décennie (Hasni et Potvin, 2015; OCDE, 2006, 2008; Osborne, Simon et Collins, 2003). À ce sujet, plusieurs études corrélationnelles ont conclu à l'existence d'une corrélation positive entre, d'un côté, la réussite en sciences à l'école et, de l'autre côté, l'attitude envers les sciences (Osborne *et al.*, 2003; Reynolds et Walberg, 1992; Schibeci, 1984; Simpson et Oliver, 1990; Weinburgh, 1995) et l'attitude envers les carrières scientifiques (Bryan, Glinn et Kittleson, 2011; Koszalka, 2002; Masnick, 2010). Certaines de ces études ont, de surcroît, conclu à l'existence d'un lien causal entre la réussite académique préalable en sciences et l'attitude ultérieure envers les sciences. Par exemple, Reynolds et Walberg (1992) ont calculé que la performance académique en sciences en 10^e année expliquait 15 % de la variance de l'attitude envers les sciences en 11^e année.

Ainsi, un faible niveau de compétence scientifique semble être un facteur directement lié à un désintérêt envers les carrières scientifiques et techniques. Nombre de

gouvernements et d'organismes éducationnels ont exprimé leurs préoccupations en rapport avec cette situation et ont fait de l'amélioration du niveau de compétence scientifique de la population l'une de leurs priorités (European Commission, 2011; International Council of Associations for Science Education [ICASE], 2001; Osborne *et al.*, 2003). En particulier, l'OCDE (2007b, p. 122) a écrit dans un rapport dirigé par le Conseil directeur PISA qu'il importe « que tous les individus, et pas seulement les futurs scientifiques et ingénieurs, possèdent un niveau plus élevé de compétences en sciences ». Au Québec, le Conseil de la science et de la technologie (CST) a, dans la même veine, écrit ce qui suit dans son rapport de conjoncture de 2004 (p. XVI) :

Les sciences et la technologie apportent une contribution majeure au fonctionnement de la société, que leur place dans les apprentissages initiaux ne reflète guère à l'heure actuelle. Les sociétés modernes, à l'instar du Québec, visent une augmentation ambitieuse de leurs objectifs de scolarisation pour répondre aux exigences croissantes du marché du travail et de la vie en société. À cette fin, il convient de transmettre aux élèves le bagage de connaissances scientifiques et technologiques nécessaires à leur intégration réussie dans la société du savoir, peu importe leurs choix professionnels futurs.

La recherche a par ailleurs permis d'établir que plusieurs facteurs peuvent être associés aux difficultés des apprenants à acquérir une compétence satisfaisante en sciences. Ces facteurs peuvent notamment être d'ordres affectif, social, scolaire ou cognitif.

1.2 Facteurs associés aux difficultés académiques en sciences

D'abord sur le plan affectif, la recherche a révélé une corrélation significative entre la réussite académique en sciences et une multitude de construits affectifs. Des exemples de ces construits sont la motivation à réussir (Gungor, 2007), le concept de soi scientifique (Oliver et Simpson, 1988) et le sentiment d'auto-efficacité (Kiray,

Gok et Bozkir, 2015). L'intérêt a également été établi par plusieurs études comme étant un prérequis important pour l'apprentissage des sciences (Erten, 2008; Hizarci, Atilboz et Salman, 2005). Sur les plans social et scolaire, nombre de facteurs ont été significativement corrélés par la recherche à la réussite en sciences. Des exemples en ce sens sont notamment les médias, comme l'exposition à des émissions de télévision ou à des sites web à contenu scientifique, le temps d'enseignement accordé en classe aux sciences ainsi que la compétence et l'expérience de l'enseignant (Reynolds et Walberg, 1991, 1992). Sur le plan cognitif, le quotient intellectuel est un facteur ayant été fortement corrélé à la réussite dans plusieurs disciplines scolaires, dont les sciences (Deary, Strand, Smith et Fernandes, 2007; Lynn, 2010). Enfin, un autre facteur d'ordre cognitif ayant été fortement associé aux difficultés académiques des apprenants en sciences concerne les *conceptions alternatives* qu'ils entretiennent (Kocyigit, 2003; Liu, 2010), soit le facteur auquel s'intéressera le présent mémoire.

1.3 Conceptions alternatives en sciences

Un fait substantiellement établi par la recherche scientifique est que l'un des facteurs les plus importants pouvant expliquer les difficultés éprouvées par les apprenants des sciences est le savoir informel préalable qu'ils possèdent avant même tout apprentissage formel des sciences (diSessa, 2014; Eryilmaz, 2002). Les études dans les champs de la psychologie développementale et des sciences de l'éducation ont ainsi abondamment documenté le fait que les jeunes enfants n'ayant pas encore été exposés à une instruction formelle fournissent des réponses erronées systématiques et similaires à des questions portant sur des concepts scientifiques contre-intuitifs dans plusieurs branches du savoir scientifique, comme les propriétés de la matière (Carey, 1999), le cycle du jour et de la nuit (Vosniadou et Brewer, 1994), les forces mécaniques (diSessa, 1993), la température et la chaleur (Wiser et Amin, 2001), les caractéristiques du vivant (Mintzes, Trowbridge, Arnaudin et Wandersee, 1991) ou

l'électricité (Shipstone, 1984). Ces erreurs systématiques témoignent de la présence, au sein des structures cognitives des apprenants, de conceptions alternatives, qui constituent des représentations naïves par rapport aux entités et phénomènes naturels auxquelles adhèrent les apprenants des sciences (Bêty, 2009; Chi et Roscoe, 2002; Potvin, 1998, cité dans Legendre, 2005, p. 270). En rapport avec les branches du savoir énumérées ci-dessus, des exemples de conceptions alternatives sont, respectivement, les suivants : croire que les poudres ne sont pas des substances solides (Babai et Amsterdamer, 2008), que le Soleil tourne autour de la Terre (National Science Foundation, 2014; Sadler, 1987), que les objets plus lourds tombent plus vite que les objets plus légers (Brown et Hammer, 2008; diSessa, 1993; Jugueta, Go et Indias, 2012), que la chaleur et le froid sont des substances matérielles pouvant être transférées d'un objet à un autre (Erickson, 1979, 1980), que les plantes obtiennent leur nourriture du sol via leurs racines (Anderson, Sheldon et Dubay, 1986) ou qu'un seul fil reliant une batterie à une ampoule suffit pour que celle-ci s'allume (Cepni et Keles, 2006; Osborne, 1981, 1983; Shipstone, 1984).

Les conceptions alternatives en sciences ont fait l'objet d'une quantité considérable d'études, qui se sont intensifiées à partir des années 1970 (Duit et Treagust, 2003). Ces études ont permis d'établir que les conceptions alternatives possèdent un nombre de caractéristiques pouvant poser problème lors de l'instruction scientifique formelle. D'abord, bien que les conceptions alternatives semblent intuitivement vraies et qu'elles peuvent, aux yeux de l'apprenant, expliquer le monde qui l'entoure de façon fonctionnelle, elles ne sont pas conformes au savoir scientifique normatif. Elles peuvent même être entièrement contraires à celui-ci, causant ainsi des interférences importantes lors de l'apprentissage formel d'un grand nombre de concepts scientifiques contre-intuitifs (Carey, 2000; Nussbaum et Novick, 1982; Toussaint, 1991, 2001). Un exemple en ce sens est l'adhésion à un modèle astronomique géocentrique, qui est contraire au modèle héliocentrique scientifiquement admis (Vosniadou et Brewer, 1992). Également, les conceptions alternatives sont résistantes

aux stratégies d'enseignement traditionnelles. Plusieurs études ont en effet établi que les apprenants adhéraient toujours à des conceptions alternatives même après avoir reçu un enseignement explicite des concepts scientifiquement admis (Clement, 1982; Liu, 2001; Treagust et Duit, 2008). Cette constatation a amené les auteurs à conclure que les conceptions alternatives « résistent aux efforts didactiques » des praticiens (Astolfi, Peterfalvi et Vérin, 2006, p. 46). Dans la même veine, la recherche a démontré que les conceptions alternatives persistaient à travers la scolarité. Cette conclusion s'appuie sur la présence de conceptions alternatives constatée non seulement chez les apprenants des niveaux préscolaire et primaire (p. ex. : Doran, 1972; Smolleck et Hershberger, 2011), mais également chez les apprenants des niveaux secondaire (p. ex. : Kucukozer et Kocakulah, 2008; Svandova, 2014) et universitaire (Gunstone et White, 1981; Periago et Bohigas, 2005). Une dernière caractéristique problématique des conceptions alternatives est leur présence ubiquitaire, qui a par exemple été démontrée à travers les différents niveaux d'aptitudes scolaires et à travers les différentes cultures.

1.3.1 Conceptions alternatives à travers les niveaux d'aptitude scolaire

Un certain nombre d'études ont comparé la prévalence des conceptions alternatives chez des populations d'élèves ou étudiants considérés comme doués académiquement, par rapport à des étudiants considérés comme moyens. Par exemple, Peters (1982) a observé que des étudiants universitaires en physique inscrits dans un cheminement Honor, en comparaison à des étudiants au cheminement régulier, commettaient les mêmes erreurs dues à des conceptions alternatives dans les sous-domaines de la cinématique, de la dynamique, du magnétisme et de l'électricité. Similairement, Placek (1985) a observé que, dans le sous-domaine de la cinématique, des élèves du secondaire doués (11^e année), possédant un quotient intellectuel moyen estimé à 146, adhéraient aux mêmes conceptions alternatives que des élèves plus

moyens, possédant un quotient intellectuel moyen estimé à 116. Plus récemment, des résultats similaires ont été obtenus avec une cohorte d'élèves de 10^e année doués inscrits dans une école spéciale, et ce, dans les domaines de la chimie, de la physique, de l'astronomie et des sciences de la Terre (Kolar et Ho-Wisniewski, 2009). Ces études tendent donc à démontrer que les apprenants des sciences adhèrent à des conceptions alternatives nonobstant leur niveau d'aptitude scolaire.

1.3.2 Conceptions alternatives à travers les cultures

Sur le plan culturel, plusieurs études se sont penchées sur la comparaison de la prévalence et de la nature des conceptions alternatives entre différentes cultures. Dans leur imposante revue de littérature, Wandersee, Mintzes et Novak (1994, p. 186) ont conclu que les études ayant comparé le phénomène des conceptions alternatives à travers les pays occidentaux développés, pays possédant une culture plutôt convergente, ont trouvé peu de différences significatives.

Plus récemment, dans le cadre d'une étude développementale, Stavy *et al.* (2006) ont comparé la prévalence et le type de conceptions alternatives en mécanique et en thermodynamique chez des élèves de trois cultures divergentes, soit des élèves australiens aborigènes, israéliens et taïwanais. Cette étude a notamment conclu qu'en début de scolarité, les élèves des trois cultures adhéraient, dans des proportions similaires, aux mêmes conceptions alternatives. Par exemple, la presque totalité des élèves croyait qu'un objet plus lourd chute plus rapidement qu'un objet plus léger. Au niveau secondaire, malgré des différences de prévalence significatives attribuées à la qualité de l'éducation reçue, cette étude a observé que l'adhésion à cette conception alternative demeurait fort élevée à travers les trois cultures. Ainsi, 90 % des élèves australiens aborigènes, 50 % des élèves israéliens et 45 % des élèves taïwanais adhéraient toujours à cette conception alternative. Dans la même veine, Abrahams,

Homer, Sharpe et Zhou (2015) ont comparé la prévalence et le type de conceptions alternatives chez des étudiants universitaires anglais et chinois dans différents sous-domaines de la physique, comme la mécanique, l'optique ou l'électricité. Ces auteurs ont conclu que les étudiants universitaires anglais adhéraient aux mêmes conceptions alternatives en physique que les étudiants chinois, malgré que la prévalence de conceptions alternatives était en moyenne de 28 % plus élevée chez les étudiants anglais. Par exemple, 45 % des étudiants anglais adhéraient à une conception alternative concernant les circuits électriques, contre seulement 25 % des étudiants chinois.

Ces études tendent donc à démontrer le caractère universel des conceptions alternatives à travers les différentes cultures, mais révèlent également la présence de différences dans les trajectoires développementales de l'adhésion à ces conceptions entre les élèves de différentes cultures. Ces constatations suggèrent, par conséquent, la présence de certaines causes communes pouvant expliquer l'adhésion universelle des apprenants à des conceptions alternatives, mais également la présence de certaines causes qui diffèrent.

1.4 Causes possibles de la genèse de conceptions alternatives

Sur les plans épistémologique et philosophique, plus d'un mécanisme a été décrit afin d'expliquer la genèse de conceptions alternatives chez les apprenants des sciences. Notamment, l'un des postulats expliquant cette genèse est à l'effet que ces conceptions alternatives correspondent à un savoir naïf construit par un mécanisme d'énumération inductive à partir d'observations et d'expériences personnelles répétées portant sur des phénomènes naturels de son environnement (Carruthers, Stich et Siegal, 2002). Ce postulat est assimilable à du positivisme logique, une position philosophique dérivée de l'empirisme lockien et postulant que les expériences

sensorielles forment le fondement de la connaissance, puisque l'être humain n'est qu'une *tabula rasa* ou « coquille vide » à sa naissance (Locke, 1690/2015; Locke, 1690, cité dans Baillargeon, 2010). Un autre mécanisme, antonymique au précédent sur les plans épistémologique et philosophique, consiste plutôt dans le postulat selon lequel l'être humain naît avec un certain savoir naïf inné concernant les phénomènes naturels qui l'entourent (Carey, 2004 ; Zirbel, 2004). Contrairement à la théorie empirique, un tel postulat est plutôt assimilable à de l'innéisme platonicien, qui considère l'être humain comme une *tabula inscrite* ou « coquille remplie » dès sa naissance (Baillargeon, 2010). Ces postulats peuvent ainsi expliquer l'aspect universel ou transculturel des conceptions alternatives chez les apprenants des sciences.

Parmi les causes pouvant expliquer les trajectoires développementales différentes des conceptions alternatives chez les apprenants, l'une des principales soulignées dans la littérature est l'instruction reçue. D'abord, certains auteurs précisent le danger qu'un enseignant ou autre adulte de confiance, comme un parent, puissent eux-mêmes adhérer à certaines conceptions alternatives, les transmettant ainsi aux apprenants (Zirbel, 2004). Des études récentes ont d'ailleurs démontré que les étudiants au baccalauréat en enseignement ainsi que les enseignants diplômés, tout particulièrement au niveau primaire, adhèrent toujours à un nombre élevé de conceptions alternatives dans les diverses disciplines scientifiques, comme l'astronomie (Korur, 2015), les sous-domaines de la physique, tels que la mécanique et le magnétisme (Burgoon, Heddle et Duran, 2010), les sciences de la Terre (Khalid, 2001) ou les sciences du vivant (Galvin, Simmie et O'Grady, 2015).

D'autres auteurs arguent que même les enseignants n'adhérant plus eux-mêmes à des conceptions alternatives peuvent néanmoins renforcer celles-ci chez leurs élèves par leur incapacité à identifier et à tenir compte des conceptions alternatives de leurs élèves lors de l'enseignement des sciences (Gomez-Zwiep, 2008; Sadler *et al.*, 2013;

Thompson et Logue, 2006). D'autres auteurs (Atkin, 2014; King, 2012) précisent en outre que les manuels et cahiers d'exercices utilisés lors de l'apprentissage formel des sciences, tantôt par erreur pure et simple, tantôt dans un effort de simplifier certains concepts scientifiques, peuvent renforcer des conceptions alternatives chez les élèves. Par exemple, une étude récente (Hubisz, 2001) a déterminé que douze des manuels scolaires les plus utilisés en sciences aux États-Unis contenaient l'équivalent de 500 pages d'erreurs scientifiques. Enfin, Thouin (2009) identifie d'autres causes sous-jacentes à la genèse de conceptions alternatives, comme le langage courant qui comporte des mots ou expressions non scientifiques (p. ex. : utilisation du terme *poids* au lieu du terme *masse*) et la culture populaire (p. ex. : les caractéristiques phénotypiques de l'enfant proviendraient du mélange du sang de ses parents plutôt que de l'ADN).

Par ailleurs, la problématique importante posée par les conceptions alternatives en sciences a donné lieu à un autre champ de recherche qui leur est directement associé, soit le champ du *changement conceptuel*.

1.5 Changement conceptuel en sciences

Le changement conceptuel en sciences peut être vu, dans un sens général, comme le processus d'apprentissage d'un concept scientifique contre-intuitif pour lequel l'apprenant adhère, initialement, à une conception alternative (Duit, 1999 ; Legendre, 2005; Ozdemir et Clark, 2007; Thouin, 1996). Il y a généralement consensus dans la littérature scientifique à l'effet que le changement conceptuel est un processus long et ardu à réaliser, et ce, à cause des caractéristiques problématiques des conceptions alternatives décrites précédemment (diSessa, 2006; Lee et Byun, 2012). Comme les conceptions alternatives, le changement conceptuel a été abondamment étudié par la littérature scientifique, souvent de pair avec celles-ci. La

bibliographie combinée la plus exhaustive portant sur les articles qui se sont intéressés à ces deux objets de recherche, soit celle de Pfundt et Duit, recensait au-delà de 1 000 articles en 1985 (Pfundt et Duit, 1985), alors que ce nombre avait augmenté à environ 6 000 articles en 2009 (Duit, 2009). Par ailleurs, bien qu'il ait connu une éclosion significative dans la décennie 1980 (Vosniadou, Vamvakoussi et Skopeliti, 2013), le champ de recherche sur le changement conceptuel tire ses origines de sources plus anciennes.

1.5.1 Bref historique du changement conceptuel

Les origines du changement conceptuel peuvent être retracées dans deux principales sources. La première consiste dans les travaux du psychologue génétique suisse Jean Piaget et de ses collaborateurs, tandis que la deuxième consiste dans les théories de certains philosophes et historiens des sciences contemporains, notamment l'Américain Thomas Kuhn (diSessa, 2006; Vosniadou, 2008).

Les travaux de Piaget et de ses collaborateurs se sont étalés entre les années 1920 et 1970 et ont culminé en de multiples publications, comme *La psychologie de l'intelligence* (1942) et *La psychologie de l'enfant* (1966), qui ont eu une influence considérable dans le champ de recherche du changement conceptuel. Sur le plan épistémologique, l'épistémologie génétique piagétienne peut être perçue comme une reformulation radicale de l'épistémologie transcendantale kantienne, qui considérait les structures de la cognition humaine comme un *a priori* génétiquement prédéterminé, invariable et non modifiable (Liben, 1983). À l'opposé de ce structuralisme invariant de Kant, la théorie piagétienne a plutôt mis l'accent sur le développement et la variance des structures cognitives chez l'être humain par des processus comme l'accommodation, l'assimilation et l'équilibration. Piaget a ainsi grandement contribué à introduire le *constructivisme* dans la recherche sur

l'apprentissage et le changement conceptuel (Gilliéron, 1996; Vosniadou *et al.*, 2013). En outre, les travaux de Piaget ont permis de produire un riche corpus de savoirs sur les conceptions alternatives des enfants ainsi que sur les stades de développement de leur raisonnement dans plusieurs disciplines scientifiques, par exemple en biologie (p. ex. : le concept d'être vivant) ou en mécanique (p. ex. : les concepts de force ou de simultanéité). Ce sont tout particulièrement les travaux piagétiens en biologie qui ont eu une grande influence ultérieure dans le champ de recherche sur le changement conceptuel. Les études dans ce champ s'inscrivent, par conséquent, dans une approche principalement constructiviste (diSessa, 2006).

Nonobstant l'influence piagétienne, les travaux de certains philosophes des sciences, au cours des années 1960 et 1970, ont également eu une influence subséquente marquée sur le champ de recherche du changement conceptuel. Une des figures les plus marquantes en ce sens a été le philosophe américain Thomas Kuhn, qui a postulé une théorie nouvelle sur le progrès du savoir scientifique, à savoir la théorie de la discontinuité radicale ou des *révolutions scientifiques*. Dans son livre intitulé *The structure of scientific revolutions* (1970), Kuhn a en effet théorisé que le progrès scientifique est un processus révolutionnaire. Une révolution, selon la définition de Kuhn, est une période de changement radical lors de laquelle un nouveau paradigme scientifique remplace l'ancien paradigme, entraînant ainsi une compréhension d'un concept, théorie ou modèle scientifique qui est incommensurablement différente entre les deux paradigmes.

Subséquemment, dans les années 1980, les théories de Piaget et de Kuhn ont été introduites dans le champ de recherche sur le changement conceptuel par les travaux de plusieurs chercheurs, notamment ceux de Carey (1985a) ainsi que ceux de Posner, Strike, Hewson et Gertzog (1982). À ce sujet, Posner *et al.* (1982) sont les auteurs de l'un des premiers modèles de changement conceptuel, connu comme le *modèle classique* et à la suite duquel une multitude d'autres modèles de changement

conceptuel ont vu le jour (Potvin, 2013). Les nombreux modèles de changement conceptuel retrouvés dans la littérature sont tantôt davantage descriptifs, tantôt davantage prescriptifs, et il existe plusieurs points de dissension entre eux. L'un de ces principaux points est le devenir de la conception alternative après la complétion par l'apprenant d'un changement conceptuel.

1.5.2 Dissension parmi les modèles de changement conceptuel

Un nombre considérable de modèles de changement conceptuel ont vu le jour, tout particulièrement dans les décennies 1980 et 1990. Plusieurs classifications de ces modèles sont possibles. L'une d'entre elles consiste à classer les modèles selon qu'ils sont davantage *descriptifs* (p. ex. : Caravita et Halden, 1994; Chi, Slotta et de Leeuw, 1994; diSessa, 1993; Dole et Sinatra, 1998 ; Pines et West, 1986; Roschelle, 1991; Stavy et Tirosh, 2000; Thagard, 1992; Tytler et Prain, 2010) ou davantage *prescriptifs* (p. ex. : Clement, 1993; Dykstra, Boyle et Monarch, 1992; Klopfer, Champagne et Gunstone, 1983; Li, Law et Lui, 2006; Osborne et Wittrock, 1993; Posner *et al.*, 1982; She, 2001). Les modèles davantage descriptifs consistent principalement à décrire comment le processus de changement conceptuel survient tout en ne fournissant que peu ou pas de recommandations pédagogiques utilisables en salle de classe. Les modèles davantage prescriptifs contiennent eux aussi fréquemment une description du processus de changement conceptuel, mais se concentrent principalement à fournir des recommandations pédagogiques utilisables en salle de classe. Ces recommandations prennent souvent la forme d'une séquence d'enseignement par étapes à suivre pour induire un changement conceptuel chez l'apprenant.

Une autre classification possible des modèles de changement conceptuel, qui est aussi un point de dissension entre modèles, est le devenir de la conception alternative une

fois un changement conceptuel complété. À ce sujet, il existe deux perspectives divergentes, soit celle du *remplacement* et celle de la *coexistence* (Bélangier, 2011; Potvin, 2013). D'abord, le modèle classique de Posner *et al.* (1982), longtemps considéré comme le modèle dominant, postule que, lors du processus de changement conceptuel, il se produirait un remplacement des conceptions alternatives par les concepts scientifiques normatifs dans les structures cognitives de l'apprenant. Une fois le changement conceptuel complété, les conceptions alternatives n'existeraient donc plus dans les structures cognitives. Il ne serait ainsi nécessaire, selon cette vision, d'expliciter les conceptions alternatives des élèves qu'au début d'une séquence longitudinale d'enseignement devant mener à un changement conceptuel. Le modèle de Posner *et al.* (1982) a été suivi par la parution d'une multitude de modèles subséquents de changement conceptuel. Bon nombre de ces modèles ont postulé, similairement à Posner *et al.* (1982), le remplacement des conceptions alternatives (Hewson, 1981; Jensen et Finley, 1995; Nussbaum et Novick, 1982; Thagard, 1992). D'autres parmi ces modèles, bien que n'utilisant pas explicitement le terme *remplacement*, s'inscrivent néanmoins dans la perspective du remplacement. Ces modèles ont postulé, par exemple, que les conceptions alternatives seraient *transformées* (Giordan et de Vecchi, 1987), *abandonnées* (Villani, 1992), *restructurées* (Carey, 1985a, 1985b; diSessa, 1993; Gallistel *et al.*, 2014; Hewson, 1992; Jensen et Finley, 1995; Vosniadou et Brewer, 1992; Vosniadou, Ioannides, Dimitrakopoulou et Papademetriou, 2001), *éliminées* (Nersessian, 1998), *enlevées* (Chi, 1992; Chi et Roscoe, 2002) ou *modifiées* (Limon, 2001) dans les structures cognitives de l'apprenant lors du processus de changement conceptuel.

Certains des modèles ultérieurs à celui de Posner *et al.* (1982) se classent toutefois plutôt dans la perspective de la coexistence. Ces modèles ont postulé que les conceptions alternatives seraient toujours présentes dans les structures cognitives de l'apprenant même après la réalisation d'un changement conceptuel, et qu'elles y cohabiteraient avec les concepts scientifiques appris au lieu d'être remplacées par

ceux-ci. À titre d'exemple, l'un des premiers auteurs à soulever la théorie de la coexistence, Solomon (1983, p. 50), a argumenté que « such socialized knowledge [c.-à-d. : les conceptions alternatives] cannot ever, by its very nature, be extinguished ». Dans la même lignée, Linder (1993, p. 295) a, pour sa part, souligné que « it would seem inadequate to depict meaningful learning in terms of a changing of conceptions (in the sense of a mental exchange) ». Mortimer (1995), quant à lui, était d'avis que l'apprentissage de concepts scientifiques contre-intuitifs consiste en un changement de profils, plutôt qu'en un changement de conceptions. Cet auteur a ainsi écrit que « it is possible to use different ways of thinking in different domains and [...] a new concept does not necessarily replace previous and alternative ideas » (Mortimer, 1995, p. 1).

Ces deux perspectives théoriques divergentes quant au devenir des conceptions alternatives des apprenants donnent également lieu à des considérations pratiques différentes. Ainsi, selon la théorie du remplacement, l'objectif du praticien serait de remplacer, supprimer ou transformer les conceptions alternatives de ses élèves par les concepts scientifiques normatifs. Dans cette vision, lorsque les élèves produisent des réponses correctes en rapport avec un concept scientifique donné, il s'agirait vraisemblablement du signe témoignant de l'abandon des conceptions alternatives liées à ce concept. Le praticien ne ferait alors plus aucun retour subséquent sur ces conceptions alternatives, puisqu'elles sont censées ne plus exister au sein des structures cognitives des apprenants. Selon la théorie de la coexistence, l'objectif du praticien est le même, soit de faire apprendre à ses élèves un nouveau concept scientifique et à leur faire produire des réponses ou des explications conformes aux savoirs scientifiques à enseigner. En revanche, même après la production de telles réponses, le praticien devrait continuer à effectuer des retours sur les conceptions alternatives associées à ce concept, et ce, afin d'aider ses élèves à contrôler leur tendance spontanée à réutiliser ces conceptions alternatives dans certains contextes (Potvin, 2013).

Selon l'une ou l'autre de ces deux perspectives théoriques, le praticien n'agirait conséquemment pas de la même manière et n'instaurerait pas les mêmes stratégies, méthodes et techniques d'enseignement dans sa classe. Ces implications pratiques ont donc rendu particulièrement important le fait de déterminer ce qu'il advient des conceptions alternatives des apprenants des sciences lors du processus de changement conceptuel. Tel qu'il sera plus amplement décrit au chapitre 2 du présent mémoire, une quantité considérable d'études au cours des quinze dernières années, utilisant soit une approche de recherche psycho-cognitiviste (p. ex. : Babai, Sekal et Stavy, 2010), soit une approche neuroscientifique (p. ex. : Masson, Potvin, Riopel et Brault Foisy, 2014), ont permis d'appuyer substantiellement la théorie de la coexistence. Ces études ont en effet montré que les conceptions alternatives continuent à coexister avec les concepts scientifiques dans la structure cognitive de l'apprenant longtemps après l'apprentissage de ces concepts. Ces études ont de plus permis de déterminer qu'un mécanisme majeur impliqué dans le processus de changement conceptuel est le *contrôle inhibiteur*. Le contrôle inhibiteur est considéré comme étant la capacité à résister à l'interférence causée par une réponse tentante, mais non pertinente dans un contexte donné (Borst *et al.*, 2013; Houdé, 2007), soit, dans le cas présent, la réponse associée à une conception alternative.

Bien que ces preuves empiriques récentes tendent à soutenir fortement la thèse de la coexistence, d'autres points de dissension majeurs demeurent néanmoins entre les différents modèles de changement conceptuel. L'un de ces points, en lien direct avec le devenir de la conception alternative décrit ci-dessus, concerne la *séquence longitudinale* optimale à travers laquelle un apprenant des sciences doit passer afin de compléter effectivement un changement conceptuel. Cette séquence longitudinale peut être vue sous au moins deux angles.

Le premier angle est en rapport avec la structure cognitive de l'apprenant et concerne notamment les états successifs de cette structure à travers lesquels un apprenant passe

pour compléter un changement conceptuel. Cet angle fait également référence aux mécanismes cognitifs que l'apprenant doit mobiliser lors du processus de changement conceptuel. Par exemple, l'état cognitif initial d'un apprenant novice par rapport à un concept scientifique donné consisterait en une adhésion ferme à une ou des conceptions alternatives associées à ce concept et à l'utilisation systématique de ces conceptions dans tout contexte. Le concept scientifique, non appris encore, serait absent de la structure cognitive de l'apprenant. En revanche, l'état cognitif final, après complétion d'un changement conceptuel, consisterait en une adhésion ferme au concept scientifique et à l'utilisation systématique de ce concept dans tout contexte, mais également à la coexistence de la conception alternative, toujours présente dans la structure cognitive. Cet état cognitif final serait aussi marqué, tel que décrit précédemment, par la mobilisation du mécanisme cognitif de contrôle inhibiteur pour résister à l'interférence causée par la ou les conceptions alternatives associées au concept. Quant au deuxième angle, en lien direct avec le premier, il concerne les stratégies, méthodes et techniques d'enseignement que le praticien doit successivement mettre en place pour activer chez l'apprenant les mécanismes cognitifs favorisant la complétion d'un changement conceptuel et, ainsi, favoriser la complétion d'un changement conceptuel.

Concernant le débat sur la séquence longitudinale optimale, il existe, dans un sens général, ici aussi deux perspectives divergentes dans la littérature scientifique (Potvin, 2013). Selon la première perspective, dite « classique », la première étape du processus de changement conceptuel est à l'effet que les apprenants doivent être exposés aux limites et insuffisances explicatives de leurs conceptions alternatives, pour ainsi créer un état cognitif d'insatisfaction par rapport au pouvoir explicatif de leurs conceptions (p. ex. : Nussbaum et Novick, 1982; Posner *et al.*, 1982; Vosniadou *et al.*, 2001). Ce n'est qu'une fois cette première étape franchie que, selon la perspective classique, les apprenants peuvent être exposés au concept scientifique à faire apprendre afin qu'ils en perçoivent le pouvoir explicatif ou l'utilité supérieure.

En revanche, la deuxième perspective, plus récente, adhère plutôt à la séquence inverse, soit qu'il faut que (1) les apprenants soient exposés dans un premier temps aux concepts scientifiques de façon à ce qu'ils en perçoivent le pouvoir explicatif ou l'utilité, avant d'être (2) exposés au pouvoir explicatif limité ou insuffisances de leurs conceptions alternatives (Ohlsson, 2009; Potvin, 2013). Cette deuxième perspective s'inspire notamment de certains postulats du philosophe des sciences Thomas Kuhn (1962, p. 77), qui écrivait par exemple que « a scientific theory is declared invalid only if an alternate candidate is available to take its place ». En plus d'inspirations philosophiques, les auteurs de cette deuxième perspective s'appuient *a fortiori* sur les études psycho-cognitivistes et neuroscientifiques récentes qui appuient la théorie de la coexistence. Notamment, Potvin (2013) argumente principalement que, puisque les conceptions alternatives continuent à coexister avec les concepts scientifiques longtemps après l'apprentissage de ces derniers, exposer l'apprenant aux limites explicatives de ses conceptions alternatives dès le début d'une séquence d'enseignement serait inefficace. Les raisons invoquées sont à l'effet que (1) cela ne permet pas d'éradiquer la conception alternative de la structure cognitive de l'apprenant et que (2) l'apprenant ne possède pas d'alternative sérieuse à sa conception pour mieux expliquer le monde qui l'entoure. Au contraire, exposer l'apprenant au concept scientifique et à son pouvoir explicatif supérieur dès le début d'une séquence longitudinale d'enseignement permettrait, selon Potvin (2013), d' (1) intégrer le concept scientifique dans la structure cognitive de l'apprenant et offrirait ainsi à l'apprenant une alternative sérieuse à sa conception alternative dès le départ de la séquence et (2) hausserait la probabilité que l'apprenant explique dorénavant le monde qui l'entoure en fonction du concept scientifique plutôt qu'en fonction de sa conception alternative.

Ainsi, il ressort de ce qui précède qu'une meilleure connaissance de la séquence d'états cognitifs et de mécanismes cognitifs sous-tendant la complétion d'un changement conceptuel peut avoir des répercussions sur l'adoption d'une séquence

d'enseignement visant à induire un changement conceptuel. En effet, une meilleure connaissance de ces états et de ces mécanismes peut contribuer à guider le praticien vers le choix d'une séquence d'enseignement qui vise précisément à provoquer une séquence optimale de modifications dans la structure cognitive de l'apprenant et ainsi à favoriser la complétion d'un changement conceptuel. À ce sujet, Tergan et Oestermeier (1993, p. 1–2) écrivaient d'ailleurs, il y a près de 25 ans, que « There is a need for research concerning the cognitive processes of knowledge restructuring as well as the instructional conditions that may foster processes of conceptual change ».

Toutefois, malgré le fait que le changement conceptuel ait été l'un des champs les plus étudiés en sciences de l'éducation depuis les années 1980 (Rusanen, 2014) et qu'un nombre considérable de modèles de changement conceptuel aient été proposés dans la littérature scientifique (Vosniadou, 2013), il n'y a pas de consensus à ce jour quant aux états cognitifs successifs et aux mécanismes cognitifs qui sous-tendent la complétion d'un changement conceptuel (Rusanen, 2014; diSessa, 2014). À ce sujet, diSessa (2017, p. 5) écrivait récemment que « understanding the basic issues of the nature of elements [...] that contribute to or block conceptual change, together with their [...] dynamics during learning (learning mechanisms) remains a compelling challenge for the field to resolve ».

Vu l'importance du débat concernant cette séquence longitudinale optimale et les implications pratiques évidentes en rapport avec ce débat, une section du chapitre 5 du présent mémoire traitera conséquemment des liens entre les résultats de la présente étude et les postulats sous-tendant ce débat. À ce stade-ci du propos, il convient cependant d'examiner plus en détail les apports des études psycho-cognitivistes et neuroscientifiques récentes dont les observations appuyent fortement (1) la thèse de la coexistence des conceptions alternatives avec les concepts scientifiques dans la structure cognitive même après la complétion d'un changement conceptuel (2) la

thèse de l'importance du mécanisme cognitif de contrôle inhibiteur dans la complétion d'un changement conceptuel.

1.6 Études psycho-cognitivistes sur le changement conceptuel en sciences

Les études regroupées dans cette catégorie ont apporté une contribution significative à une meilleure compréhension du processus de changement conceptuel en sciences. Malgré le regroupement commun utilisé ici, ce corpus d'études est en fait un tout relativement hétérogène pouvant être scindé en plus d'un sous-corpus en fonction, notamment, du type de méthodologie et de participants employés. Le plus imposant sous-corpus d'études psycho-cognitivistes (p. ex. : Babai et Amsterdamer, 2008; Babai, Levyadun, Stavy et Tirosh, 2006; Babai *et al.*, 2010; Shtulman et Valcarcel, 2012) s'est intéressé à des étudiants avancés dans leur scolarité (c.-à-d. : fin secondaire à début université) et ayant bénéficié de plusieurs cours de sciences formels préalables. Chacune de ces études a observé que ces étudiants commettaient significativement plus d'erreurs et répondaient significativement plus lentement à des items contre-intuitifs sous-tendant une conception alternative (p. ex. : *Le Soleil tourne autour de la Terre*) qu'à des items ne sous-tendant pas de conception alternative (p. ex. : *La Lune tourne autour de la Terre*). Les auteurs de ces études ont par conséquent conclu que les conceptions alternatives étaient toujours présentes dans les structures cognitives de ces étudiants et qu'elles interféraient avec les concepts scientifiques normatifs appris à l'école au moment de fournir une réponse. Il a de plus été postulé que des mécanismes de raisonnement plus exigeants cognitivement étaient alors mis en œuvre afin de surmonter l'interférence (Stavy et Babai, 2008) et de supprimer la conception alternative (Shtulman et Valcarcel, 2012), notamment un mécanisme de « contrôle inhibiteur » (Stavy et Babai, 2010, p. 627).

Des conclusions similaires ont par ailleurs été tirées par des études psychodéveloppementales (Lafortune, Masson et Potvin, 2012; Potvin, Masson, Lafortune et Cyr, 2015) qui se sont plutôt intéressées à de jeunes élèves (c.-à-d. : primaire à début secondaire), ainsi que par un sous-corpus d'études psychodéveloppementales qui se sont intéressées à des participants âgés souffrant de démence (Lombrozo, Kelemen et Zaitchik, 2007; Zaitchik et Solomon, 2008, 2009). La démence affaiblissant la capacité de contrôle inhibiteur, une réémergence de réponses en conformité avec des conceptions alternatives a en effet été observée chez les patients âgés déments. Cette constatation a mené les auteurs à conclure que les conceptions alternatives n'avaient probablement jamais cessé de coexister avec les concepts scientifiques normatifs dans la structure cognitive de ces patients et qu'elles avaient ressurgi à cause de leur incapacité à les inhiber. Dans la même lignée, un autre sous-corpus d'études psychocognitivistes (Kelemen et Rosset, 2009; Kelemen, Rottman et Seston, 2013) ont déterminé que même des participants ayant une expertise scientifique très poussée fournissaient davantage de réponses en conformité avec des conceptions alternatives lorsqu'ils devaient répondre sous une contrainte de temps importante. Similairement aux études précédentes, les auteurs de ces études ont par conséquent conclu que cette réémergence de conceptions alternatives, même chez des participants experts, témoignait de la coexistence dans leur structure cognitive de conceptions alternatives avec les concepts scientifiques normatifs. Les auteurs ont également conclu que la contrainte de temps importante ne permettait pas aux participants de mobiliser efficacement leur mécanisme de contrôle inhibiteur pour répondre correctement. Enfin, un dernier sous-corpus d'études psychocognitivistes (Kwon et Lawon, 2000; Thibault, 2013) est constitué d'études corrélationnelles s'étant intéressées à des élèves du secondaire. Ces études ont déterminé que la capacité de contrôle inhibiteur pouvait expliquer approximativement entre 18 % (Thibault, 2013) et 28 % (Kwon et Lawson, 2000) du gain d'apprentissage conceptuel observé durant un trimestre scolaire.

Malgré ces apports majeurs, l'approche psycho-cognitiviste présente des limites importantes pour l'étude du changement conceptuel. En effet, elle ne permet d'observer que de façon indirecte, au moyen de données comportementales comme le temps de réaction, les mécanismes cognitifs (p. ex. : contrôle inhibiteur) mobilisés dans le processus de changement conceptuel (Lu et Doshier, 2007; Stillings, 1995). De plus, l'interprétation selon laquelle il y aurait activation du mécanisme de contrôle inhibiteur à cause d'un temps de réaction plus long est grandement tributaire de la qualité de la tâche. Ainsi, un temps de réaction plus long indique la mise en place d'un processus de raisonnement plus complexe et plus exigeant cognitivement qui implique davantage d'étapes de raisonnement ou des étapes plus longues, mais pas nécessairement la mise en place du mécanisme de contrôle inhibiteur.

L'utilisation de techniques d'imagerie cérébrale, dans le cadre d'une approche neuroscientifique, permet de surmonter ces limites et s'avère complémentaire dans l'étude du changement conceptuel. La neuroimagerie permet en effet d'observer directement, *in vivo*, les activations cérébrales et de les associer à des mécanismes cognitifs en fonction d'hypothèses préétablies que la tâche conçue vise à vérifier.

1.7 Études neuroscientifiques sur le changement conceptuel en sciences

L'approche neuroscientifique en éducation peut être sommairement définie comme étant un champ de recherche interdisciplinaire et relativement récent, consistant à combiner les neurosciences, la biologie, la psychologie cognitive et les sciences de l'éducation afin d'étudier diverses problématiques éducatives (Fischer, 2009; Fischer *et al.*, 2007; Geake, 2011; Legendre, 2005; Pettito et Dunbar, 2004). Cette approche comporte certains avantages pour l'étude du changement conceptuel.

L'avantage le plus notable consiste en l'ajout d'un niveau d'analyse supplémentaire dans l'étude du processus de changement conceptuel, soit l'observation directe de l'activité du cerveau humain lorsqu'un apprenant répond à des questions en sciences (Dunbar, Fugelsang et Stein, 2007; Geake et Cooper, 2003; Masson, 2012). Cela est notamment rendu possible grâce au (1) développement de multiples techniques d'imagerie cérébrale, en particulier l'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle ou IRMf, ainsi qu'à (2) l'avancement fulgurant des connaissances sur la structure et le fonctionnement du cerveau humain qui a eu lieu au cours des deux dernières décennies de recherche en neurosciences cognitives (OCDE, 2002, 2007a). Cette double avancée des techniques et des connaissances permet de vérifier, au moyen d'une inférence de type « vers l'avant », des hypothèses de recherche préétablies de la forme « Si la tâche expérimentale X mobilise le mécanisme cognitif Y, alors l'aire cérébrale Z sera activée ». Ce type d'inférence a lieu en deux temps et elle est illustrée à la figure 1.1, figure qui est inspirée de Poldrack (2006) et de Henson (2006). Dans un premier temps, lorsqu'une tâche expérimentale (TÂCHE) est spécifiquement conçue pour mobiliser un mécanisme cognitif précis (COG), la probabilité (P) que ce mécanisme cognitif soit mobilisé pour exécuter cette tâche devient presque une certitude : $P(\text{COG}|\text{TÂCHE}) = 1$. La prémisse affirmant que la tâche expérimentale X mobilise le mécanisme cognitif Y peut alors être considérée comme vraie. Dans un deuxième temps, puisque la prémisse est vraie, l'activation d'une région cérébrale Z (ACT) observée par neuroimagerie permet d'inférer de façon valide si, effectivement, le mécanisme cognitif attendu a été mobilisé ou non. En effet, bien que les diverses régions cérébrales soient fréquemment impliquées dans plus d'un mécanisme cognitif (Poldrack et Wagner, 2004), c'est la spécificité de la tâche à mobiliser le mécanisme cognitif postulé qui permet de tirer cette inférence.

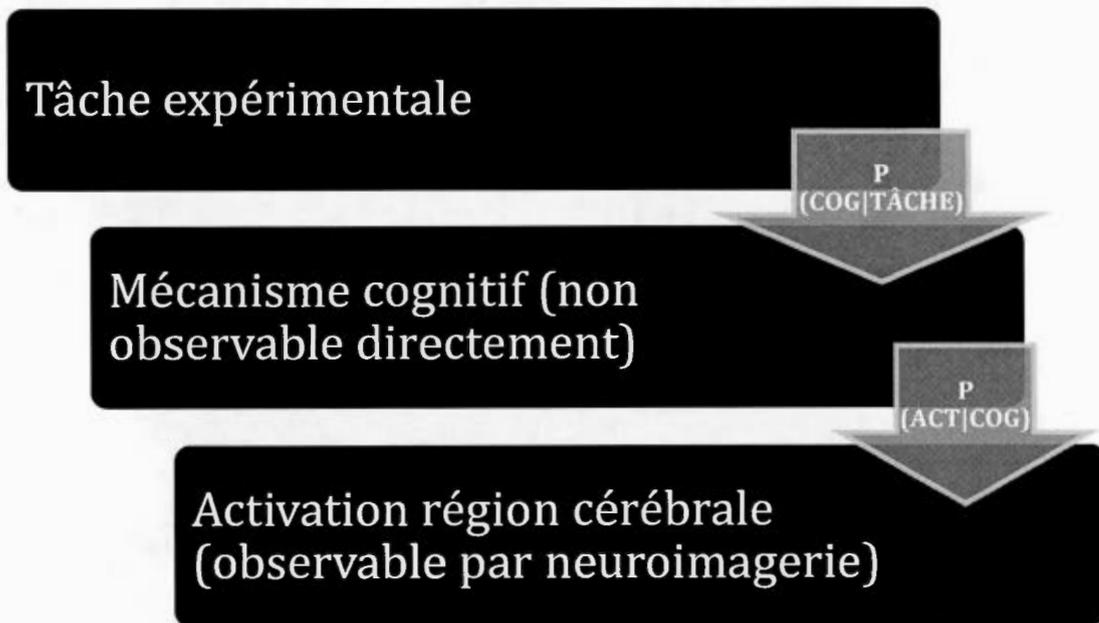


Figure 1.1. Illustration de l'inférence « vers l'avant ». Ce type d'inférence est celui généralement recommandé pour vérifier des hypothèses de recherche en neuroéducation, contrairement à l'inférence inverse qui est généralement proscrite.

En bref, le changement conceptuel en sciences a jusqu'à récemment été étudié selon des approches principalement constructiviste et psycho-cognitiviste. L'approche neuroscientifique en permet donc une compréhension plus riche, en complémentarité avec les autres approches, comme le soulignent Dunbar *et al.* (2007) : « Neuroscience provides us with another level of analysis that, when used together with traditional cognitive approaches, can provide us with a deeper understanding of learning and education. »

Les principaux apports de l'approche neuroscientifique dans l'étude du changement conceptuel en science peuvent se résumer, à ce jour, comme étant les deux suivants : (1) avoir apporté des preuves empiriques supplémentaires soutenant la théorie selon laquelle les conceptions alternatives coexistent toujours avec les concepts scientifiques normatifs même après la complétion d'un changement conceptuel; (2) avoir confirmé le rôle majeur du mécanisme cognitif de contrôle inhibiteur dans la complétion d'un changement conceptuel (Brault Foisy, Potvin, Riopel et Masson,

2015; Dunbar *et al.*, 2007; Masson *et al.*, 2014). Ces études ont en effet observé que, pour parvenir à répondre correctement à des questions en sciences impliquant certaines conceptions alternatives fréquentes, des experts en sciences, comparativement à des novices, devaient activer des régions du cerveau sous-tendant le contrôle inhibiteur. Les auteurs de ces études ont donc conclu que, malgré que ces participants répondaient systématiquement de façon scientifique et n'adhéraient donc plus à des conceptions alternatives, ils ne parvenaient à répondre de façon scientifique qu'en faisant preuve de contrôle inhibiteur, c'est-à-dire en résistant et en bloquant leur tendance erronée à répondre en conformité avec leurs conceptions alternatives (Masson, Potvin et Riopel, 2010). Ce besoin de contrôle inhibiteur a donc amené les auteurs de ces études à conclure que les conceptions alternatives étaient toujours présentes dans les réseaux neuronaux (entités équivalant à la structure cognitive, mais au niveau cérébral) même chez des participants experts ayant complété un changement conceptuel.

1.8 Positionnement de la présente étude, angle nouveau de traitement et question générale de recherche

La présente étude s'inscrit dans une approche neuroscientifique, et, plus précisément, dans le sous-domaine de la neurodidactique des sciences. Ce sous-domaine peut se décrire comme faisant l'étude des mécanismes cognitifs impliqués dans l'apprentissage et l'enseignement des sciences au moyen de techniques de neuroimagerie (Masson, 2007). En outre, la présente étude se situe dans la continuité immédiate des études neuroscientifiques (Brault Foisy *et al.*, 2015; Dunbar *et al.*, 2007; Masson *et al.*, 2014) préalables qui ont examiné le changement conceptuel en sciences. Elle reprend par conséquent plusieurs des éléments méthodologiques de ces études, mais adopte un angle de traitement du changement conceptuel nouveau. En effet, ces trois études antérieures ont consisté en des études transversales comparant l'activité cérébrale d'experts et de novices en sciences, soit des participants aux

extremums du processus de changement conceptuel. Ces études ont permis de déterminer que les experts, comparativement aux novices, faisaient preuve de contrôle inhibiteur afin de surmonter leur tendance erronée à répondre conformément à leurs conceptions alternatives.

La présente étude, en revanche, sera plutôt de type pré-post-test et consistera en une comparaison de l'activité cérébrale et du temps de réaction de novices en sciences avant et après qu'ils aient surmonté une conception alternative fréquente. Cette étude permettra ainsi de mieux connaître les mécanismes cognitifs mobilisés par des novices en sciences qui se trouvent à un stade précoce du processus de changement conceptuel, voire n'ont pas encore du tout entamé ce processus. Par conséquent, la question générale de recherche à laquelle la présente étude tentera de répondre se lit comme suit :

Quel(s) mécanisme(s) cognitif(s) les apprenants novices en sciences mobilisent-ils après avoir surmonté une conception alternative fréquente comparativement à avant d'avoir surmonté cette conception?

1.9 Pertinence scientifique et sociale

En résumé, considérant qu' (1) une amélioration de la compétence scientifique des jeunes dans la société actuelle est souhaitable, que (2) les apprenants des sciences entretiennent un nombre considérable et varié de conceptions alternatives au regard des entités et phénomènes naturels, que (3) ces conceptions représentent un obstacle reconnu lors de l'apprentissage formel de concepts scientifiques contre-intuitifs, que (4) les mécanismes cognitifs mobilisés par des apprenants novices afin de surmonter leurs conceptions alternatives demeurent peu connus, que (5) il y a dissension entre les modèles de changement conceptuel quant à la séquence longitudinale optimale, dont les mécanismes cognitifs, à travers laquelle un apprenant des sciences doit

passer afin de compléter un changement conceptuel et que (6) une meilleure connaissance de ces mécanismes pourrait mener à de nouvelles stratégies, méthodes ou techniques d'enseignement des concepts scientifiques contre-intuitifs, il apparaît pertinent de (7) chercher à atteindre une meilleure compréhension des mécanismes cognitifs mobilisés par des novices en sciences au tout début du processus de changement conceptuel lorsqu'ils surmontent une conception alternative fréquente à laquelle ils adhèrent. En particulier, les connaissances nouvelles issues de la présente étude pourraient contribuer à mener à de nouvelles pistes pédagogiques pouvant guider les enseignants de sciences dans l'enseignement de concepts scientifiques contre-intuitifs.

Par exemple, advenant l'éventualité où il serait observé que le mécanisme de contrôle inhibiteur est mobilisé chez les novices de façon similaire aux experts, cela suggérerait que ce mécanisme est impliqué dès le début du processus de changement conceptuel et, possiblement donc, tout au long de la séquence longitudinale que traverse un novice lors du processus de changement conceptuel. Conséquemment, un tel résultat pourrait éventuellement mener à considérer une intervention pédagogique visant à aider les élèves à inhiber leurs conceptions alternatives comme une intervention intéressante à implanter dès le début de la séquence d'enseignement d'un nouveau concept scientifique contre-intuitif. Or, de telles interventions existent dans la littérature scientifique et se sont révélées comme étant efficaces notamment dans les domaines du raisonnement logique (Houdé *et al.*, 2000, 2001) et de la géométrie (Babai, Shalev et Stavy, 2015). À titre d'exemple, Houdé *et al.* (2000) ont utilisé une tâche d'appariement de formes où l'utilisation d'une stratégie intuitive tentante, mais erronée, amenait lors d'un pré-test les participants à commettre systématiquement des erreurs d'appariement. Une intervention visant à aider les participants à inhiber leur stratégie intuitive erronée a ensuite été appliquée. Cette intervention comprenait (1) des alertes émotives, consistant à attirer explicitement l'attention des participants sur leur tendance à utiliser la stratégie intuitive erronée, et des (2) exercices consistant à

identifier et à rejeter des réponses erronées découlant de l'utilisation de cette stratégie. Au post-test, il a été observé que le taux de réponses correctes des participants avait nettement augmenté et qu'il y avait activation des régions cérébrales sous-tendant le mécanisme de contrôle inhibiteur. Bref, si le mécanisme de contrôle inhibiteur s'avérait être impliqué chez des novices en sciences au tout début d'un processus de changement conceptuel, cette intervention simple et rapide pourrait, après vérification de son efficacité par une étude empirique, être transférée en sciences et constituer un ajout bénéfique dans la formation initiale ou continue des enseignants du primaire et possiblement des enseignants des sciences au secondaire.

Advenant, au contraire, l'éventualité où les novices mobiliseraient un autre mécanisme que le contrôle inhibiteur afin de surmonter leur conception alternative, cela suggérerait qu'il semble y avoir une différence entre les mécanismes cognitifs recrutés par les experts et les novices et, donc, que les mécanismes cognitifs impliqués dans la séquence longitudinale menant à un changement conceptuel ne semblent pas être les mêmes tout au long de cette séquence. Un tel résultat pourrait ainsi indiquer qu'une intervention visant à aider les élèves à inhiber leurs conceptions alternatives ne serait pas bénéfique au tout début de la séquence d'enseignement d'un nouveau concept scientifique contre-intuitif, puisque le contrôle inhibiteur serait associé à un niveau d'expertise plus avancé, voire même à un changement conceptuel déjà complété.

CHAPITRE II

CADRE THÉORIQUE

Ce deuxième chapitre a comme buts principaux de définir les concepts centraux de la présente étude, de décrire les perspectives théoriques sous-jacentes et d'effectuer une revue de la littérature pertinente afin de poser les hypothèses de recherche. Pour ce faire, ce chapitre sera divisé en plusieurs sections. La première section procédera à une analyse conceptuelle du concept de *conception alternative* et traitera également des conceptions alternatives fréquentes en électricité. La deuxième section procédera à une analyse conceptuelle du concept de *changement conceptuel*, décrira la perspective constructiviste sous-tendant ce concept et présentera quelques modèles de changement conceptuel parmi les plus connus. La troisième section se penchera à définir le mécanisme de *contrôle inhibiteur*, traitera des régions cérébrales associées à ce mécanisme, puis fera ressortir l'importance de ce mécanisme cognitif dans le changement conceptuel en sciences en procédant à une revue de la littérature cognitive et neuroscientifique pertinente. Enfin, la quatrième et dernière section de ce chapitre consistera à poser les hypothèses de recherche.

2.1 Notion de *conception alternative* en didactique des sciences

2.1.1 Terme *conception alternative* parmi une pléthore de termes

Tel qu'expliqué dans la section précédente du présent mémoire, les conceptions alternatives détenues par les apprenants des sciences sont une des causes majeures des difficultés éprouvées par ceux-ci. Ces conceptions ont fait l'objet de beaucoup de recherches, qui se sont intensifiées tout particulièrement à partir des années 1970 (Duit et Treagust, 2003). L'emploi du terme *conception alternative*, utilisé dans le présent texte, ne fait toutefois pas consensus dans la littérature. Ce terme s'est en effet vu attribuer une multitude d'autres expressions, relativement synonymes, dans la littérature scientifique émergente sur cet objet. Ces expressions peuvent être regroupées en deux catégories générales, selon qu'elles dénotent une perspective épistémologique *nomothétique* ou *idéographique* du savoir détenu par les apprenants (Driver et Easley, 1978; Wandersee *et al.*, 1994).

La perspective nomothétique se focalise sur l'écart existant entre le savoir des apprenants et le savoir scientifique normatif, le premier étant perçu comme erroné par rapport au second. Le savoir des apprenants est ainsi évalué par rapport à sa conformité au savoir scientifique établi, le terme nomothétique signifiant « fondé sur la loi ». Des exemples de termes correspondant à cette perspective sont les suivants : *concepts erronés* (Matteson et Kambly, 1940), « *misconceptions* » (Ralya et Ralya, 1940), *idées erronées* (Fisher, 1983), *sources sous-jacentes d'erreur* (Fisher et Lipson, 1986), ou « *persistent pitfalls* » (Mayer, 1987). En revanche, la perspective idéographique a une vision plus neutre du savoir préalable des apprenants, qui est considéré comme une « idée » en soi, de manière similaire à l'étude des croyances d'une culture par un anthropologue. Des exemples de termes correspondant à cette deuxième perspective sont les suivants : *cadre conceptuel alternatif* (Driver et Easley, 1978), *idées alternatives* (Engel et Driver, 1981), *conceptions alternatives*

(Hewson, 1981), *préconceptions* (Hashweh, 1988), ou *modèles personnels de la réalité* (Champagne, Gunstone et Klopfer, 1985).

Gilbert et Swift (1985), Abimbola (1988), puis ultérieurement Wandersee *et al.* (1994), après avoir effectué des revues de la littérature concernant les différents termes utilisés, ont conclu que l'expression *conception alternative* était très probablement la plus appropriée, et ce, pour deux principaux motifs. Concernant le premier motif, cette expression, contrairement à celles dénotant une perspective nomothétique, n'accorde pas un statut hiérarchiquement inférieur au savoir préalable des apprenants. Elle démontre plutôt un respect intellectuel pour leurs idées et reconnaît le fait que ce savoir préalable peut parfois avoir un certain pouvoir explicatif. En 1989, Millar remarquait d'ailleurs que l'historique du champ de recherche démontrait un mouvement marqué de remplacement de l'expression « *misconception* » par l'expression *conception alternative*, laissant ainsi entrevoir la reconnaissance d'un savoir scientifique intuitif propre aux enfants, aussi appelé « *children's science* ». Dans la même veine, Cormier (2014) souligne que le savoir préalable des apprenants n'est pas toujours totalement erroné et peut parfois, au contraire, être partiellement correct scientifiquement et valide dans certains contextes. Cette auteure remarque aussi qu'associer le savoir initial des apprenants à des erreurs comporte une connotation à charge émotionnelle négative.

Quant au deuxième motif, par rapport à d'autres expressions au sein de la perspective idéographique, comme *cadre conceptuel alternatif*, celle de *conception alternative* est plus spécifique et plus près de la structure cognitive de l'apprenant et des idées qu'il possède par rapport aux entités et phénomènes naturels qui l'entourent (Abimbola, 1988; Wandersee *et al.*, 1994). Cormier (2014), allant dans le même sens, souligne que l'expression *conception alternative* semble être la plus utilisée par les auteurs anglo-saxons dans l'historique récent de ce champ de recherche, mais que d'autres expressions parmi celles énumérées ci-dessus sont néanmoins toujours couramment

employées. Cette auteure remarque aussi que la notion de *cadre conceptuel alternatif* a un sens plus générique et représente, par rapport à la notion de *conceptions alternatives*, ce qu'un *cadre conceptuel* représente par rapport à un *concept*. Selon cette auteure, un *cadre conceptuel alternatif* est, par conséquent, une notion plus difficilement reconnaissable et plus difficile à opérationnaliser. Elle semble par conséquent moins utile dans le cours normal de la recherche et de l'enseignement.

Pour ces motifs, l'expression retenue dans le cadre du présent mémoire est donc celle de *conception alternative*. Par souci de concision, le simple terme *conception* sera utilisé par endroits.

2.1.2 Sens du terme *conception alternative*

La notion de *conception alternative*, incluant ses expressions relativement équivalentes énumérées ci-dessus, a été définie d'une multitude de manières dans la littérature scientifique. Bêty (2009), après avoir recensé ces différentes définitions, a remarqué que celles-ci pouvaient varier selon plusieurs facteurs, notamment l'explication que les auteurs souhaitaient fournir par rapport au changement conceptuel, le cadre méthodologique adopté dans leur étude et leur perspective épistémologique. Sur le plan épistémologique, Bêty souligne que les conceptions alternatives peuvent être définies selon la perspective qu'elles représentent des obstacles à l'apprentissage ou, à l'opposé, selon la perspective qu'elles représentent des appuis sur lesquels se construit le savoir scientifique normatif.

Concernant des exemples de définitions correspondant davantage à la première perspective, Posner *et al.* (1982) définissent les conceptions comme étant une écologie conceptuelle caractérisée par des anomalies, des analogies, des métaphores et des croyances métaphysiques. Brewer (1999) leur attribue le sens de théories

naïves sur le monde naturel qui diffèrent des théories scientifiquement acceptées. Chi et Roscoe (2002) les caractérisent comme un savoir naïf, acquis soit à l'école, soit dans l'expérience de tous les jours et étant en conflit avec les concepts scientifiques à faire apprendre. Windschitl (2001, p. 19) écrit, pour sa part, que « learners hold highly idiosyncratic alternative conceptions about natural phenomena that may be at odds with scientific explanations » et décrit ces conceptions comme étant pauvrement articulées et inconsistantes.

À l'opposé, certains auteurs ont défini les conceptions alternatives davantage selon la deuxième perspective épistémologique d'appui à la constitution du savoir. Ainsi, Osborne *et al.* (1983) perçoivent les conceptions alternatives comme étant le sens du monde que les enfants acquièrent avant de recevoir une instruction scientifique formelle. Quant à diSessa (1993), il les définit comme le sens intuitif de mécanismes causaux qui mène à des prédictions et à des explications de phénomènes ou d'événements naturels. Driver et Easley (1978, p. 62) décrivent pour leur part les conceptions des élèves comme étant des « commonsense frameworks developed by the individual's project to manage her or his practical world in a pragmatic or ethical way ». Enfin, Sequiera et Leite (1991) soulignent que le processus de construction de conceptions alternatives débute très tôt dans la vie de l'apprenant et mène à la construction de concepts possédant un degré incomplet de différenciation et des sens alternatifs.

Par ailleurs, malgré une certaine divergence quant à la définition de la notion de *conception alternative*, les caractéristiques problématiques propres à ces conceptions font généralement l'objet d'un consensus auprès des chercheurs, car elles sont appuyées par une quantité considérable d'études empiriques. Trois caractéristiques particulièrement problématiques, mentionnées dans le chapitre précédent de ce mémoire, sont la *persistance* des conceptions alternatives tout au long de la scolarité (Wandersee *et al.*, 1994), leur *résistance* aux stratégies d'enseignement

traditionnelles (Treagust et Duit, 2008) et leur *fonctionnalité* (Potvin, 1998, cité dans Legendre, 2005).

Concernant la *persistance*, elle est notamment démontrée par des études ayant révélé la présence des mêmes conceptions alternatives chez des étudiants dans des baccalauréats scientifiques que chez des élèves du niveau primaire. Par exemple, une étude de Periago et Bohigas (2005) a examiné si un groupe d'étudiants ($N = 184$) de deuxième année dans des baccalauréats de génie industriel et chimique adhéraient toujours à certaines conceptions en électricité. Pour ce faire, un questionnaire comprenant un total de 9 items portant sur des concepts de base en électricité, comme le potentiel électrique et l'intensité du courant, a été administré aux participants. Chacune de leurs réponses a été classée dans trois catégories possibles, allant de la catégorie I (réponse scientifiquement correcte et justifiée) à la catégorie III (réponse dénotant une conception alternative). Les résultats obtenus par cette étude sont à l'effet que des pourcentages considérables de ces étudiants adhéraient toujours à des conceptions alternatives. À titre d'exemples, 44,0 % des participants croyaient encore que le courant faiblit ou se consomme à mesure qu'il circule dans un circuit électrique, et 10,4 % croyaient encore qu'une ampoule pouvait s'allumer en n'étant reliée qu'à un seul pôle de la batterie. Des résultats pointant dans le même sens ont été obtenus par Kanim (2001) chez des étudiants en génie mécanique. Cette étude a notamment trouvé que 25 % des participants adhéraient à la conception du courant qui faiblit ou se consomme. Or, ces exemples de conceptions sont les mêmes que celles entretenues par des élèves du niveau primaire (Cepni et Keles, 2006; Shipstone, 1988, 1998; Shipstone et Gunstone, 1985; Shipstone, Jung, et Dupin, 1988), quoique les pourcentages d'adhésion à ces conceptions soient considérablement plus élevés au primaire.

Quant à la *résistance* des conceptions alternatives à être enrayées au moyen des stratégies d'enseignement traditionnelles, elle est appuyée notamment par des études

ayant constaté que les apprenants adhéraient toujours à des conceptions alternatives même après avoir reçu un enseignement formel de concepts scientifiques contre-intuitifs. Par exemple, Clement (1982) a examiné l'effet d'un cours de physique mécanique traditionnel sur la compréhension conceptuelle des lois newtoniennes chez des étudiants au baccalauréat en génie mécanique ($N = 150$). Un questionnaire comportant trois tâches écrites a été utilisé avant et après le cours afin de mesurer leur compréhension conceptuelle. L'une des tâches en particulier demandait aux participants d'illustrer les forces impliquées dans le lancement d'une pièce de monnaie dans les airs. L'analyse de cette tâche a mené au résultat le plus notable de cette étude, à savoir que, à la fin du cours, 72 % des participants ont répondu qu'une force supérieure à la gravité devait être imprégnée par la « force du lancer » à la pièce de monnaie. Ces étudiants adhéraient donc toujours à une conception alternative des lois newtoniennes, soit la théorie de l'*impetus*, qui serait une force ou entité imprégnée à un objet pour lui imposer un mouvement dans une direction souhaitée jusqu'à la dissipation de l'effet de cet *impetus* (diSessa, 1993). Ce résultat est similaire à ceux de plusieurs autres études, comme celle de Gunstone (1987), qui a entre autres déterminé que 43 % des finissants du secondaire ($N = 5\,534$), malgré le fait d'avoir suivi plusieurs cours de physique au cours de leur cheminement, adhéraient toujours à la conception selon laquelle la présence d'un mouvement constant chez un objet implique une force agissant constamment sur cet objet dans le même sens que son mouvement. Utilisant une méthode différente, Kim et Pak (2001) se sont intéressés à des étudiants universitaires inscrits dans un cours de physique et ayant résolu une moyenne estimative de 1 500 exercices ou problèmes de physique traditionnels durant leurs cursus secondaire et universitaire combinés. Cette étude a trouvé, similairement aux précédentes, que des pourcentages significatifs de ces étudiants adhéraient toujours à diverses conceptions en mécanique. Par exemple, 41 % croyaient qu'une force réciproque de même module et de sens inverse était exercée par des blocs se trouvant côte à côte sur une surface plane, dénotant ainsi une conception alternative fréquente quant à la troisième loi de Newton.

En plus d'être persistantes et résistantes à l'enseignement, un autre consensus dans la littérature est à l'effet que les conceptions alternatives des apprenants sont *fonctionnelles*, puisqu'elles leur permettent fréquemment d'expliquer le comportement de la nature autour d'eux. À cet effet, ces conceptions correspondent souvent à des explications parallèles de phénomènes naturels qui faisaient, autrefois, office de savoir scientifique normatif (diSessa, 2006; Wandersee *et al.*, 1994). Deux des exemples fournis ci-dessus, soit (1) la théorie de la nécessité d'une force pour qu'un corps meuve et (2) la théorie de l'*impetus*, en sont des illustrations concrètes. Ces théories représentaient en effet le savoir scientifique normatif pour des générations précédentes de scientifiques et de philosophes et permettaient à ceux-ci d'expliquer fonctionnellement le comportement de la nature dans la limite de leurs observations et expériences. La première théorie correspond à la physique aristotélicienne et représentait le savoir scientifique communément admis à l'époque de la Grèce ancienne afin d'expliquer le monde naturel, comme le mouvement des projectiles (350 av. J.-C.). La deuxième théorie correspond à de la physique moyenâgeuse et a vu le jour en contestation à la physique aristotélicienne, qui présentait, pour les savants du Moyen Âge, certaines limites quant à sa capacité à expliquer fonctionnellement le mouvement des corps et, particulièrement, des projectiles. Les penseurs à l'origine de l'*impetus* sont des philosophes marquants de cette époque, comme l'Italien Franciscus de Marchia.

Concernant l'importance de la fonctionnalité des conceptions alternatives, Legendre (2005, p. 269-270, 1179) explique que ces conceptions sont un savoir naïf constitué de représentations internes d'idées et d'images explicatives utilisées par l'apprenant pour expliquer les phénomènes naturels au quotidien. Dans la même veine, Potvin (1998, cité par Legendre, 2005, p. 270) ajoute ce qui suit :

Bien que les conceptions intuitives ne soient pas en conformité avec les concepts scientifiques admis, elles sont généralement pertinentes du point

de vue de celui qui les utilise, car elles lui permettent de comprendre et d'expliquer, dans une certaine mesure, le monde qui l'entoure. Elles sont issues des réalités usuelles, sont souvent automatisées depuis longtemps et sont liées à l'âge des individus qui les détiennent.

Considérant les définitions énumérées ci-dessus quant à la notion de *conception alternative* ainsi que les caractéristiques attribuées de façon consensuelle par la littérature à cette notion, la définition conceptuelle retenue dans le cadre du présent mémoire sera la suivante :

Conception alternative : savoir totalement ou partiellement non scientifique détenu par un apprenant des sciences, consistant en des représentations internes d'idées et d'images explicatives des phénomènes naturels. Ce savoir est persistant, résistant au changement et permet généralement d'expliquer de façon fonctionnelle le monde naturel environnant. Il peut être acquis avant tout enseignement formel des sciences ou pendant celui-ci.

La conception alternative est ainsi la version non scientifique d'un *concept scientifique*, celui-ci étant, quant à lui, la représentation abstraite d'un objet ou phénomène naturel qui, à l'opposé de la conception, correspond à la norme scientifiquement admise (Legendre, 2005, p. 266, 269). De façon opérationnelle, la conception alternative peut être définie comme une variable latente pouvant se traduire, à un niveau comportemental, par des manifestations observables. Ces manifestations, au sein de la littérature scientifique du champ, consistent dans les réponses non scientifiques systématiquement fournies par les apprenants aux items d'un instrument de mesure, comme un questionnaire ou un entretien visant à mesurer leur compréhension conceptuelle (Treagust, 1988). Dans le cadre de ce texte, ces réponses non scientifiques porteront ainsi le nom d'*erreurs naïves*, soit des erreurs qui consistent à répondre en conformité avec une conception alternative.

2.1.3 Conceptions alternatives en physique électrique

Un nombre considérable d'études ont examiné les conceptions détenues par les apprenants en électricité en lien avec une multitude de concepts scientifiques propres à cette discipline. Ces études ont ainsi permis d'identifier un nombre important de conceptions touchant, notamment, les concepts de champ électrique (Furio et Guisasola, 1998), d'électricité statique (Park *et al.*, 2001), de différence de potentiel (Liegeois *et al.*, 2003), de résistance (Liegeois et Mullet, 2002; McIldowie, 1998; Viard et Langlois, 2001) et de capacité électrique (Guisasola *et al.*, 2002). De nombreux auteurs (Caillot et Nguyen Xuan, 1995; Carlton, 1999) soulignent en outre que l'électricité est un concept générique que les apprenants rencontrent couramment dans la vie quotidienne. Par conséquent, ils développent un nombre important de conceptions pour expliquer leurs observations en lien avec ce phénomène. Toutefois, l'invisibilité du phénomène naturel à la base de l'électricité, soit le flux d'électrons à travers les circuits électriques, rend les concepts liés à l'électricité abstraits et plus difficiles à comprendre, ce qui peut expliquer la genèse de certaines conceptions dans cette discipline (Asoko, 2002; Mikropoulos et Natsis, 2011).

Plus spécifiquement, de nombreuses études, certaines plus anciennes et d'autres plus récentes, ont examiné les conceptions des apprenants en lien avec les circuits électriques simples (Bauman et Adams, 1990; Cepni et Keles, 2006; Engelhardt et Beichner, 2004; Fredette et Clement, 1981; Heller, 1987; Kucukozer et Kocakulah, 2007, 2008; Osborne, 1981, 1983; Shipstone, 1984; Summers, Kruger et Mant, 1998). Un circuit électrique simple peut être défini comme un circuit composé d'une source de courant (p. ex. : batterie), d'une ou de plusieurs ampoules et de fils électriques. D'autres éléments peuvent également s'y retrouver, comme un résistor ou un interrupteur. Une partie du circuit peut de plus être formée par une substance liquide (p. ex. : eau) ou solide (p. ex. : objet métallique). Les études réalisées ont permis de déceler la présence d'une multitude de conceptions à tous les niveaux scolaires, allant

du primaire jusqu'à l'université. Dans leur revue de la littérature, Wandersee *et al.* (1994, p. 182), citant particulièrement les études d'Osborne (1983), de Shipstone (1984), d'Osborne et Freyberg (1985) et de Driver, Squires, Rushworth et Robinson (1994), ont conclu que les élèves de 9 à 18 ans (c.-à-d. : de la quatrième année du primaire à la première année d'université) pouvaient employer l'un parmi quatre types de conceptions alternatives en lien avec les circuits électriques simples :

1. Le modèle de l'*unipôle (single-wire model)*, selon lequel le courant quitterait la batterie pour ensuite s'écouler dans un fil jusqu'à une ampoule, de façon analogique à l'écoulement de l'eau dans un système de tuyauterie. Selon ce modèle, un circuit électrique n'aurait donc pas besoin d'être constitué d'une boucle fermée. Ce modèle alternatif, à cause de l'analogie avec l'écoulement de l'eau, est également fréquemment appelé *source-sink model* (Summers *et al.*, 1998). Ce modèle est illustré à la figure 2.1.

2. Le modèle des *courants qui se rencontrent (clashing currents model)*, selon lequel le courant quitterait la batterie par les deux bornes, positive et négative, pour se diriger vers l'ampoule, où la rencontre des deux courants provoquerait le fait que l'ampoule s'allume.

3. Le modèle du *courant qui faiblit ou se consomme dans le circuit (unidirectional without conservation)*, conception selon laquelle le courant circulerait dans un sens unique à l'intérieur du circuit, mais deviendrait graduellement plus faible à mesure qu'il rencontre des composantes, comme des ampoules, sur son chemin. Selon cette idée naïve, chaque composante du circuit utiliserait et consommerait une partie du courant, mais cette consommation ne serait pas la même pour toutes les composantes du circuit.

4. Selon le quatrième modèle (*unidirectional with sharing*), similaire au troisième, le courant circulerait également dans un sens unique à l'intérieur du circuit et faiblirait ou se consumerait graduellement à mesure qu'il rencontre des composantes sur son chemin. Cependant, à la différence du troisième modèle, le courant serait ici consommé de façon égale par toutes les composantes du circuit (p. ex. : toutes les ampoules s'allumeraient avec la même luminosité).

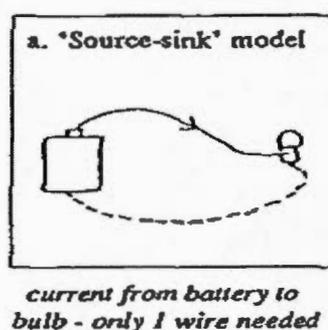


Figure 2.1. Représentation schématisée du modèle de l'unipôle. Il s'agit de la conception alternative la plus fréquente chez les apprenants les plus novices en électricité. (Figure tirée de Summers *et al.*, 1998, p. 163)

Le cinquième modèle, encore selon Wandersee *et al.* (1994, p. 182), est celui scientifiquement correct, soit le modèle unidirectionnel avec conservation. La recension de Wandersee *et al.* (1994) a également permis de déterminer que le premier modèle est le plus prédominant chez les apprenants les plus jeunes, et donc les plus novices en électricité, au-delà de 50 % d'entre eux adhérant à ce modèle. Par la suite, chez les apprenants un peu plus âgés, c'est le deuxième modèle qui devient progressivement le plus prédominant, avec une proportion d'adhésion de 35 % à 40 %. Puis, ces modèles sont progressivement remplacés par les modèles unidirectionnels. L'adhésion au modèle scientifique n'est ainsi que d'environ 10 % chez les apprenants de 12 ans et augmente jusqu'à environ 60 % chez les apprenants de 18 ans. La validité de cette classification des modèles alternatifs de Wandersee *et*

al. (1994) et leurs proportions respectives de prédominance aux différents âges ont été confirmées par plusieurs études ultérieures (Cepni et Keles, 2006; Engelhardt et Beichner 2004; Sencar et Eryilmaz, 2004; Summers *et al.*, 1998). Par exemple, Cepni et Keles (2006) ont examiné les proportions d'apprenants adhérant à ces modèles alternatifs en utilisant un échantillon composé d'élèves du primaire (5^e et 7^e années), du secondaire (9^e année) et de l'université (étudiants au baccalauréat en enseignement des sciences, respectivement en première et quatrième années). Les résultats observés étaient à l'effet que 58 % des élèves de 5^e année adhéraient au modèle de l'unipôle. Les élèves de 7^e année adhéraient, respectivement, dans une proportion de 22 % au modèle des courants qui se rencontrent et de 24 % au modèle unidirectionnel sans conservation. Chez les élèves de 9^e année, la proportion d'adhésion au modèle unidirectionnel sans conservation augmentait à 50 %, alors que celle au modèle scientifiquement correct, quasi nulle chez les élèves du primaire, était désormais de 22 %. Enfin, chez les étudiants universitaires de première année, le modèle scientifiquement correct devenait prédominant, avec une proportion d'adhésion de 58 %. Ainsi, ces proportions de prédominance sont semblables à celles suggérées par Wandersee et ses collaborateurs, et soutiennent la validité de la classification de ces derniers auteurs.

Tel que déjà abordé dans le premier chapitre du présent mémoire, les caractéristiques problématiques (p. ex. : résistance, persistance) des conceptions alternatives ont donné lieu à un champ de recherche nommé *changement conceptuel*. Ce champ s'intéresse au processus d'apprentissage de concepts scientifiques contre-intuitifs au regard desquels les apprenants adhèrent initialement à une ou des conceptions alternatives.

2.2 Notion de *changement conceptuel* en didactique des sciences

2.2.1 Sens du terme *changement conceptuel*

Il y a généralement consensus dans la littérature à l'effet que, afin d'apprendre plusieurs concepts scientifiques contre-intuitifs, les novices en sciences doivent opérer un changement conceptuel. Un autre consensus général, parmi les modèles de changement conceptuel, concerne le point de départ du processus de changement conceptuel ainsi que son point d'arrivée, décrits par diSessa (2014) en ces termes : « [Conceptual change models] are generally diachronic, typically marking the naive (entering) state on one hand and the target, normative state on the other. » Malgré ces éléments convergents, il ne semble toutefois pas y avoir de consensus concernant plusieurs points majeurs. Ces points, déjà abordés dans le chapitre 1 du présent mémoire, concernent notamment (1) ce qu'est précisément le changement conceptuel, (2) quels sont les mécanismes cognitifs le sous-tendant, (3) quelle est la méthodologie optimale pour expliquer, modeler et décrire de façon précise ces mécanismes, ou (4) quelles sont les modifications dans les éléments de la structure cognitive des apprenants (p. ex. : croyances, représentations, systèmes conceptuels) qui constituent réellement un changement conceptuel (Rusanen, 2014; Vosniadou *et al.*, 2013). Chiu (2015) résume ainsi en ces mots une partie de ce multiple manque de consensus : « In the three special handbooks on conceptual change [c.-à.-d. : sous la direction de Schnotz, Vosniadou, et Carretero, 1999; sous la direction de Vosniadou, 2008, 2013], there seems to be no consensus about the nature of knowledge structures that a learner owns. » Quant à diSessa (2013), il s'exprime comme suit : « Roughly three decades after the beginnings of conceptual change research [...] it is puzzling and ironic, given its centrality, that no consensus exists on this issue. »

Malgré ce qui précède, plusieurs définitions du changement conceptuel en sciences ont été proposées dans la littérature et permettent de dégager le sens de cette notion.

Ainsi, Duit (1999) définit le sens général du changement conceptuel en sciences en ces termes : « In a general sense, conceptual change denotes learning pathways from students' pre-instructional conceptions to the science concepts to be learned. » Vosniadou (2008, p. xvi) met, pour sa part, l'accent sur la difficulté du processus de changement conceptuel. Elle écrit en effet que le changement conceptuel en sciences ne fait pas référence à un processus d'acquisition, mais plutôt à un processus de transformation difficile, contre-intuitif et qui ne va pas de soi. Similairement à Vosniadou (2008), Barnett et Morran (2002, p. 860) soulignent le caractère complexe du processus de changement conceptuel en écrivant que « conceptual understanding is an evolutionary process that emerges from a complex interplay between prior understanding and the context in which learning occurs ». Ces auteurs écrivent également que les conceptions alternatives des élèves sont la « position de départ » à partir de laquelle se construira une compréhension scientifique robuste des concepts à apprendre. Tsai (2003, p. 308), identifie ces mêmes points de départ et d'arrivée que Barnett et Morran en expliquant que « students need to modify their existing conceptions into scientifically accepted conceptions during the course of receiving science instruction. This process is called 'conceptual change' [...] ». D'autres auteurs, dans leur définition, mettent explicitement l'accent sur le fait qu'un changement dans la structure cognitive de l'apprenant survient lorsqu'un changement conceptuel est réalisé. Par exemple She (2004, p. 146) perçoit le changement conceptuel comme « a revision of mental sets in order to achieve a more scientific view of a concept », alors que Carey (1999) le voit comme un « restructuring of mental representations ».

Enfin, Potvin (1998, cité par Legendre, 2005, p. 205), fournit quant à lui une définition qui met l'accent sur l'efficacité supérieure du concept scientifique pour expliquer le comportement des entités et des phénomènes naturels :

En enseignement des sciences, le changement conceptuel vise, par le biais de stratégies pédagogiques tel le conflit cognitif, à faire passer l'élève d'une conception scientifique à efficacité restreinte (c.-à-d. : la conception alternative) à une conception scientifique à efficacité élargie (c.-à-d. : le concept scientifique).

Ainsi, la définition générale retenue pour la notion de changement conceptuel dans le cadre du présent mémoire sera la suivante :

Changement conceptuel : Processus longitudinal et difficile consistant en l'apprentissage d'un concept scientifique contre-intuitif envers lequel l'apprenant entretenait, initialement, une ou des conceptions alternatives. Le changement conceptuel impliquant un changement dans la structure cognitive de l'apprenant, il constitue une variable latente ne pouvant être mesurée directement, mais pouvant faire l'objet d'une mesure indirecte au niveau comportemental. Par conséquent, le sens opérationnel de la notion de changement conceptuel retenu dans le cadre du présent texte sera défini comme étant les réponses *scientifiques* systématiquement fournies par les apprenants aux items d'un instrument de mesure, comme un questionnaire ou un entretien, visant à mesurer leur compréhension conceptuelle (Treagust, 1988).

2.2.2 Changement conceptuel dans une épistémologie constructiviste

Il est généralement admis que la problématique du changement conceptuel s'inscrit dans une perspective épistémologique constructiviste de l'apprentissage (diSessa, 2014; Hewson, 1992; Legendre, 2002). En éducation, le constructivisme trouve ses origines dans les travaux de Jean Piaget, souvent considéré comme le père de cette approche (Legendre, 2005). Le constructivisme peut être défini comme un apprentissage résultant d'un processus d'équilibration consistant en des déséquilibres, puis en des rééquilibrations successives entre les structures cognitives internes de

l'apprenant et le monde extérieur (Olds et Papalia, 2005). Les déséquilibres sont généralement causés par de nouvelles observations, données ou informations provenant de l'environnement et qui entrent en conflit avec l'organisation cognitive existante de l'individu, induisant ainsi un état de dissonance cognitive (Festinger, 1962, cité par Steffe et Gale, 1992, p. 279). L'équilibration, d'un point de vue biologique, peut être vue comme la capacité de la structure cognitive interne à l'organisme d'un individu à s'adapter à l'environnement externe. Cette adaptation consiste en deux mécanismes distincts, soit l'assimilation et l'accommodation (Olds et Papalia, 2005; Steffe et Gale, 1992). L'assimilation désigne l'intégration d'une nouvelle information dans la structure cognitive existante de l'apprenant. Cette nouvelle information n'induit ainsi qu'un état de déséquilibre mineur, voire aucun déséquilibre, et ne nécessite pas de modification structurale majeure de l'architecture cognitive de l'apprenant. En revanche, l'accommodation désigne une modification plus majeure que subit une structure cognitive existante afin d'intégrer une information nouvelle de l'environnement. Cette nouvelle information a ainsi induit un état de déséquilibre significatif, suivi d'un état d'équilibre approché, mais qualitativement différent de l'état initial.

Concrètement, sur le plan des apprentissages scolaires en sciences, le constructivisme correspond à la perspective selon laquelle l'apprenant possède des connaissances initiales, comme les conceptions alternatives en sciences, et qu'il construit de nouvelles connaissances sur la base de celles qui ont été antérieurement acquises (Driver *et al.*, 1994). Legendre (2002) souligne aussi que, selon la perspective constructiviste, le changement conceptuel n'est pas un processus strictement additif qui peut se réduire à une simple adjonction de nouveaux savoirs aux savoirs antérieurement acquis, mais qu'il s'agit plutôt d'un changement des représentations de l'apprenant, soit une modification plus ou moins importante de ses connaissances antérieures.

Concernant la teneur précise de cette modification, selon le point de vue constructiviste le plus couramment adopté dans la littérature, deux types de changement conceptuel peuvent survenir, le premier étant mineur et le second, majeur (Duit et Treagust, 2003; Harrison et Treagust, 2000; Tyson *et al.*, 1997). Un changement mineur consiste en une restructuration faible des connaissances de l'apprenant et correspond, selon les termes piagétiens, à une assimilation. Il s'agit ainsi d'une addition non problématique des nouvelles connaissances aux connaissances préexistantes dans la structure cognitive de l'apprenant. Hewson (1985) attribue, quant à lui, à ce genre de restructuration faible le terme de *capture conceptuelle*. Dans ce type de changement conceptuel, un concept scientifique normatif nouvellement appris peut par conséquent aisément coexister avec une conception alternative dans la structure cognitive de l'apprenant, celle-ci ne subissant alors qu'une modification minimale. À l'opposé, le deuxième type de changement conceptuel consiste en une restructuration forte, voire radicale, des connaissances antérieures de l'apprenant et correspond, selon les termes piagétiens, à une accommodation. Ce deuxième type implique une compétition entre connaissance nouvelle et connaissance préexistante, ou, en l'occurrence, entre concept scientifique et conception alternative. Lorsque ce deuxième type de changement conceptuel se concrétise, il en résulte un remplacement de la connaissance préexistante par la connaissance nouvelle au sein de la structure cognitive de l'apprenant et il y a alors accommodation. À l'inverse, la connaissance nouvelle peut être perçue comme étant une anomalie et être ignorée, exclue ou rejetée par l'apprenant (Chinn et Brewer, 1993). Il en résulte alors une rétention de la connaissance préexistante et il n'y pas d'accommodation. Hewson et Hewson (1992) postulent en outre que les connaissances remplacées ne sont pas oubliées, mais que leur statut est plutôt diminué et qu'elles peuvent être réinstaurées ultérieurement. Enfin, Duit et Treagust (2003), ainsi que Harrison et Treagust (2000), précisent également qu'un troisième type de modification des connaissances antérieures existe, soit la simple croissance additive des connaissances (*knowledge accretion*). Ce type de modification ne fait

cependant pas consensus parmi les auteurs : certains le considèrent comme un troisième type de changement conceptuel, tandis que la majorité le différencie du changement conceptuel.

2.2.3 Différents modèles de changement conceptuel

La recherche sur les conceptions alternatives en sciences s'est intensifiée tout particulièrement à partir des années 1970. Elle a examiné les conceptions alternatives des apprenants et a permis d'identifier un grand nombre de ces conceptions ainsi que leur prévalence, et ce, dans plusieurs disciplines scientifiques. Dû au défi posé par les conceptions alternatives à l'instruction scientifique formelle, un autre champ de recherche a vu le jour dans les années 1980, à savoir le champ du changement conceptuel. Ce champ de recherche s'inscrit généralement dans la continuité des travaux de Jean Piaget, soit dans une perspective épistémologique constructiviste, et a vu naître de nombreux modèles de changement conceptuel, commençant par le modèle classique de Posner *et al.* (1982). Malgré une finalité commune, c'est-à-dire expliquer et modéliser le processus de changement conceptuel, ces modèles présentent toutefois des divergences considérables, tel qu'abordé dans le premier chapitre du présent mémoire. Ainsi, dès 1992 (p. 4), Hewson écrivait ce qui suit : « In the literature on conceptual change, different interpretations have emerged ». Plus récemment, Bêty (2009) allait dans le même sens en affirmant que l'explication du processus de changement conceptuel varie d'un modèle à l'autre, et ce, selon (1) le sens attribué par les auteurs aux notions de *conception alternative* et de *changement conceptuel*, (2) les concepts scientifiques visés par le modèle, et (3) les fondements, l'axiologie et les visées du modèle. Dans la même lignée, Rusanen et Lappi (2014, p. 3331) précisaient que « There is no common understanding how to explain, model and describe in an exact way the underlying mechanisms of conceptual change ».

Tel que décrit par Bêty (2009) et comme l'explique également Legendre (2002), les modèles de changement conceptuel proposés dans la littérature scientifique peuvent être analysés selon une diversité d'approches. Une approche possible, déjà discutée au chapitre précédent, consiste à classer ces modèles selon qu'ils sont davantage descriptifs ou davantage prescriptifs. Une autre approche possible, également mentionnée au chapitre précédent, consiste à classer ces modèles selon le sens donné aux conceptions alternatives et à leur devenir lors de l'apprentissage des concepts scientifiques normatifs. Cette classification consiste ainsi à catégoriser les modèles de changement conceptuel selon qu'ils appartiennent aux perspectives divergentes du *remplacement* ou de la *coexistence* (Bélangier, 2008; Potvin, 2013). Selon la perspective du remplacement, les concepts scientifiques « délogeraient » donc les conceptions alternatives des structures cognitives de l'apprenant lors de l'apprentissage formel des sciences. En revanche, selon la perspective de la coexistence, les conceptions alternatives « cohabiteraient » toujours avec les concepts scientifiques dans les structures cognitives de l'apprenant, formant ainsi deux systèmes explicatifs à la fois différents, concurrents et complémentaires.

Hormis ces deux classifications possibles, il existe également d'autres points de dissension parmi les modèles de changement conceptuel permettant de les classer et de les analyser. Un exemple en ce sens est notamment la *taille de l'unité d'analyse* ou « grain size » considérée par le modèle pour expliquer le processus de changement conceptuel. L'unité d'analyse peut se définir comme l'élément cognitif qui est modifié dans le processus de changement conceptuel (diSessa, 2013) et il peut être de différentes tailles. Une *conception* est, par exemple, de taille plus petite qu'une *théorie* qui est, à son tour, de taille plus petite qu'un *modèle*.

Un dernier exemple de point de dissension pouvant aider à classer et à analyser les modèles de changement conceptuel a également déjà été abordé dans le premier chapitre du présent mémoire. Ce point est la *séquence longitudinale* postulée, par les

différents modèles, comme étant la séquence optimale à travers laquelle l'apprenant doit passer afin de réaliser un changement conceptuel. Il convient ici de rappeler que le principal débat en rapport avec cette séquence longitudinale (Potvin, 2013) est la question à savoir s'il faut : (A) que l'apprenant soit exposé dans un premier temps aux limites du pouvoir explicatif de sa conception alternative pour éprouver ainsi de l'insatisfaction par rapport à celle-ci, pour ensuite être exposé dans un deuxième temps au concept scientifique de façon à en percevoir le pouvoir explicatif plus performant ou l'utilité supérieure ou (B) que l'apprenant soit exposé dans un premier temps au concept scientifique de façon à en percevoir le pouvoir explicatif et l'utilité, pour ensuite être exposé au pouvoir explicatif limité de sa conception. Le principal argument soulevé en faveur de la séquence A par les auteurs adhérant à cette séquence est à l'effet que l'apprenant doit percevoir, dans un premier temps, le pouvoir explicatif limité de sa conception alternative, avant de chercher à accommoder dans sa structure cognitive un concept scientifique au pouvoir explicatif supérieur (Nussbaum et Novick, 1982; Posner *et al.*, 1982; Vosniadou *et al.*, 2001). En revanche, le principal argument soulevé en faveur de la séquence B est à l'effet que l'apprenant doit posséder d'abord dans sa structure cognitive le concept scientifique et percevoir son pouvoir explicatif élevé, avant qu'il ait envie d'abandonner sa conception alternative en percevant les limites et insuffisances explicatives de celle-ci (Ohlsson, 2009; Potvin, 2013). Dans les prochaines lignes, quelques-uns des principaux modèles de changement conceptuel proposés dans la littérature scientifique seront discutés et mis en comparaison au moyen des classifications énumérées ci-dessus, avec un accent particulier qui sera mis sur le débat ayant présentement cours au regard de la *séquence longitudinale* optimale.

2.2.4.1 Modèle de Posner et al. (1982), Posner et Gertzog (1982), Strike et Posner (1985, 1992)

Ce modèle est le plus cité dans la littérature et a été le principal modèle utilisé dans la recherche sur le changement conceptuel pendant de nombreuses années (Vosniadou, 2008, p. xiv). Il s'inspire de la théorie des révolutions scientifiques de Kuhn et de l'épistémologie piagétienne et considère qu'un processus d'accommodation cognitive est nécessaire pour qu'un changement conceptuel survienne. Selon Posner *et al.* (1982), les apprenants possèdent initialement une écologie conceptuelle constituée d'un amalgame de plusieurs types de concepts, comme des anomalies, des métaphores, des engagements épistémologiques et des croyances métaphysiques. Quatre conditions sont nécessaires, selon ce modèle, afin de provoquer un changement conceptuel. La condition de départ est de faire ressentir à l'apprenant un sentiment d'insatisfaction par rapport à sa conception alternative. Pour y parvenir, Posner *et al.* (1982) préconisent de placer l'apprenant dans une situation de *conflit cognitif* en l'exposant aux limites du pouvoir explicatif de sa conception. Le conflit cognitif, selon la perspective piagétienne à laquelle adhèrent Posner et ses collaborateurs, peut se définir comme un état de déséquilibre entre (1) la structure cognitive de l'apprenant, composée entre autres des conceptions alternatives auxquelles il adhère, et (2) des informations ou données extérieures observées dans son environnement (Olds et Papalia, 2005; Posner *et al.*, 1982). En d'autres termes, l'apprenant ne parvient pas à expliquer de façon satisfaisante ces informations ou données extérieures en utilisant les conceptions alternatives qu'il possède, ce qui crée chez lui un état de conflit, d'insatisfaction ou de doute (Legendre, 2005). L'apprenant cherche alors à pallier ce déséquilibre par une rééquilibration consistant à accommoder dans sa structure cognitive un concept nouveau, avec un meilleur pouvoir explicatif que sa conception alternative.

Ce n'est donc qu'après cette étape de conflit cognitif en lien avec sa conception que Posner et ses collaborateurs suggèrent que l'apprenant peut être exposé au concept scientifique. En outre, trois autres conditions sont nécessaires pour que l'apprenant adhère effectivement à ce nouveau concept (Posner *et al.*, 1982; Posner et Gertzog, 1982). Le nouveau concept doit en effet lui paraître (1) intelligible, c'est-à-dire qu'il comprend effectivement le concept, par exemple au moyen de l'usage de métaphores et d'analogies, et qu'il comprend les termes et symboles représentant le concept; (2) être plausible, c'est-à-dire, entre autres, être en conformité avec les engagements épistémologiques et croyances métaphysiques de l'apprenant ou être en mesure de résoudre les anomalies dues à l'utilisation de la conception alternative; (3) être fertile, c'est-à-dire détenir un pouvoir explicatif plus grand que la conception initiale par rapport à diverses situations que l'apprenant pourrait rencontrer. À la suite d'importantes critiques reprochant à ce modèle sa trop grande emphase sur la dimension cognitive (p. ex. : Pintrich, Marx et Boyle, 1993), les versions subséquentes du modèle original de Posner et de ses collaborateurs (p. ex. : Strike et Posner, 1985, 1992) ont accordé une certaine place aux facteurs affectifs pour expliquer le processus de changement conceptuel. À titre d'exemple, Strike et Posner, en révisant leur modèle original, s'exprimaient ainsi (1992, p. 149) :

A wider range of factors needs to be taken into account in attempting to describe a learner's conceptual ecology [...] The idea of a "conceptual ecology" that includes motives and goals provides a focus on the underlying factors that interact to cause individuals to maintain a certain view of the world [...]

Donc, le modèle de changement conceptuel de Posner et de ses collaborateurs est de type davantage prescriptif, postule le remplacement des conceptions alternatives des apprenants et utilise une unité d'analyse qui est la conception *per se*. En outre, tel qu'il ressort sans équivoque de la description faite ci-dessus, ce modèle prescrit que

l'apprenant doit traverser une séquence longitudinale de type A, plutôt que de type B, afin de réaliser effectivement un changement conceptuel.

2.2.4.3 Modèle de Nussbaum et Novick (1982)

Selon ce modèle, également de forte inspiration kuhnienne et piagétienne, les conceptions alternatives des apprenants jouent un rôle important dans l'apprentissage des concepts scientifiques. Ce modèle traite de *cadres conceptuels alternatifs* plutôt que de conceptions et utilise, donc, une unité d'analyse de plus grande taille que celle de conception. Pour qu'un changement conceptuel survienne, Nussbaum et Novick (1982) postulent que l'apprenant doit nécessairement passer par un processus d'accommodation piagétien et que, pour ce faire, l'instruction doit consister en trois étapes : (1) l'évocation des cadres conceptuels alternatifs de l'apprenant, permettant ainsi à celui-ci d'en prendre explicitement conscience (*exposing event*); (2) la création d'un conflit cognitif par la présentation, à l'apprenant, d'une situation entrant en conflit avec ses cadres conceptuels alternatifs (*discrepant event*); (3) l'encouragement à l'accommodation cognitive, par le soutien de l'apprenant dans sa recherche d'une solution pouvant expliquer les divergences observées à l'étape précédente. Similairement au modèle de Posner et de ses collaborateurs, le modèle de Nussbaum et Novick met ainsi l'accent sur la nécessité d'exposer dans un premier temps l'apprenant aux limites de ses cadres conceptuels alternatifs, en le confrontant à une situation dans laquelle ses cadres ne peuvent permettre une explication satisfaisante. Ce conflit engendre alors un sentiment d'insatisfaction chez l'apprenant, dénommé de façon équivalente comme un déséquilibre cognitif par Piaget (1964), comme une dissonance cognitive par Festinger (1962), ou comme un conflit conceptuel par Berlyne (1965). L'apprenant recherche alors à diminuer son état d'insatisfaction et à produire une explication plus satisfaisante, ce qui l'amène ainsi à délaisser son adhésion au cadre conceptuel alternatif au profit du cadre conceptuel scientifique.

Donc, le modèle de Nussbaum et Novick, qui est de type davantage prescriptif, postule que les conceptions des élèves doivent être remplacées lors du processus de changement conceptuel et utilise une unité d'analyse qui est celle de cadre conceptuel alternatif. De surcroît, ce modèle prescrit, tout comme Posner *et al.* (1982), que l'apprenant doit traverser une séquence longitudinale de type A, plutôt que de type B, afin de réaliser effectivement un changement conceptuel.

2.2.4.4 Modèle de Giordan et de Vecchi (1987, 1989, 1998, 2002), de Vecchi et Giordan (1994)

Giordan et de Vecchi (1987, 1989, 1994, 1998, 2002), des biochimistes de profession, proposent quant à eux un modèle de changement conceptuel appelé « modèle allostérique ». Ce modèle est dérivé par analogie avec le processus biochimique par lequel les protéines, à la suite de stimuli provenant de leur environnement, changent leur structure et leur fonction par l'adoption d'une configuration tridimensionnelle nouvelle, différente de leur configuration d'acides aminés initiale. Ainsi, selon ces auteurs (de Vecchi et Giordan, 1994; Giordan, 1998), le changement conceptuel consiste dans la transformation des conceptions alternatives initiales des apprenants. Cette transformation consiste d'abord, similairement aux deux modèles précédents, en une déconstruction des conceptions alternatives des apprenants par l'usage du conflit cognitif. Toutefois, à la différence des deux modèles précédents, ces auteurs postulent que cette étape de déconstruction n'est pas suivie par un remplacement pur et simple des conceptions, mais plutôt par une reconstruction des connaissances des apprenants consistant en une évolution progressive vers un nouvel état de connaissances. Pour favoriser cette reconstruction ou transformation, Giordan et de Vecchi soulignent l'importance de certains paramètres de l'environnement pédagogique dans lequel l'apprentissage a lieu, comme l'importance que l'apprenant soit motivé, confiant, qu'il réfléchisse sur ses savoirs préalables et qu'il trouve du sens aux nouveaux savoirs. Ainsi, ce modèle postule une transformation ou

reconstruction en profondeur des conceptions alternatives initiales des apprenants et s'inscrit dans la perspective du remplacement, bien que le remplacement postulé soit moins radical que celui des deux modèles précédemment discutés. En outre, l'unité d'analyse considérée est la *conception*, similairement à Posner *et al.* (1982), mais, à la différence des modèles de Posner *et al.* (1982) et de Nussbaum et Novack (1982), le modèle de Giordan et de Vecchi souligne à plus forte raison, dès sa version originale, l'importance de facteurs motivationnels. Quant à la séquence longitudinale, ce modèle prescrit, tout comme les deux modèles décrits précédemment, une séquence de type A plutôt que B, quoique de façon moins radicale.

2.2.4.5 Modèle de Vosniadou et Brewer (1992, 1994), Vosniadou et Skopeliti (2013), Vosniadou (2007, 2009, 2013, 2014), Vosniadou, Ioannides, Dimitrakopoulou et Papademetriou (2001)

Selon ce modèle (Vosniadou, 2007, 2009, 2013, 2014; Vosniadou et Brewer, 1992, 1994), l'état initial des connaissances des élèves est formé de *cadres théoriques naïfs* plutôt que de conceptions. Ce modèle postule que ces cadres sont notamment constitués de présuppositions et de croyances épistémologiques et ontologiques, et que le processus de changement conceptuel nécessite une révision et une modification de ces cadres (Vosniadou, 1994). Selon ce modèle, cette modification se fait graduellement et peut donner lieu, à certains points de l'apprentissage, à des *modèles mentaux synthétiques*, qui représentent des tentatives de l'apprenant de réconcilier l'information scientifique apprise avec ses présuppositions et ses croyances épistémologiques (Vosniadou, 2001). Ces modèles synthétiques représentent un état de savoir intermédiaire ou hybride et dénotent une progression de l'apprenant dans le processus de changement conceptuel. Un exemple de modèle synthétique est celui de l'apprenant qui, adhérant initialement à la théorie selon laquelle la Terre est plate, observe lors de son apprentissage des images dépeignant la Terre comme étant

sphérique. Il peut alors adhérer, durant un certain temps, au modèle synthétique selon lequel la Terre est une sphère aplatie.

Pour provoquer un processus de changement conceptuel chez l'apprenant, Vosniadou et ses collaborateurs préconisent dans un premier temps l'exposition à des informations ne pouvant être expliquées selon le cadre théorique naïf de l'apprenant. Comme les modèles précédents, ces auteurs soulignent donc l'importance d'exposer l'apprenant dans un premier temps aux limites explicatives de ses théories naïves, mais ne préconisent pas l'emploi d'un conflit cognitif aussi radical. Ils suggèrent plutôt l'emploi de problèmes, d'observations et de discussions pour faire prendre conscience à l'apprenant des limites de son cadre théorique naïf (Vosniadou, 2014). Ainsi, ce modèle, bien que postulant la nécessité de remplacer les cadres théoriques naïfs des apprenants par les concepts scientifiques, reconnaît la coexistence de ces deux entités à certains moments du processus de changement conceptuel, comme dans le cas des modèles mentaux synthétiques. Ce modèle s'inscrit par conséquent de façon moins marquée dans la perspective du remplacement. Également, certaines unités d'analyse considérées par ce modèle, comme les cadres théoriques naïfs et les modèles synthétiques, sont de plus grande taille que les unités employées par les trois modèles précédemment discutés. Enfin, tout comme les trois modèles précédemment discutés, le modèle de Vosniadou et ses collaborateurs prescrit lui aussi une séquence longitudinale de type A plutôt que B.

2.2.4.6 Modèle de diSessa (1993, 1998, 2002, 2006, 2008, 2013, 2014)

Selon le modèle de diSessa (1993, 1998, 2002, 2006, 2008, 2013, 2014), qui a été conçu pour expliquer le changement conceptuel en physique mécanique, les conceptions alternatives des élèves consistent en des *primitives phénoménologiques* (*p-prims*). Les *p-prims* sont des relations causales abstraites constituant les plus petits

éléments d'une physique mécanique alternative. Elles représentent des entités inférées intuitivement par l'apprenant à partir de ses observations de phénomènes physiques au quotidien. diSessa (1993) souligne l'importante désorganisation initiale de ces p-prims, qui consistent en un nombre considérable de petites unités ayant un certain pouvoir explicatif dans des contextes particuliers de la vie courante. Des exemples de p-prims sont les conceptions de la physique aristotélicienne ou moyenâgeuse, comme le fait de croire qu'une force est nécessaire pour causer un mouvement.

Le processus de changement conceptuel, selon diSessa, correspond à une réorganisation du système de p-prims en un système de plus en plus organisé et correspondant progressivement à un sens de la physique de plus en plus scientifique (diSessa, 2006). Cette réorganisation serait notamment rendue possible par divers mécanismes de coordination des p-prims. Donc, diSessa ne prône pas en tant que tel le remplacement des conceptions alternatives (p-prims) des apprenants, mais plutôt leur réorganisation. En outre, ce modèle utilise une unité d'analyse de taille encore plus petite que les conceptions et décrit les p-prims, par analogie avec les atomes de la matière, comme étant les « atomes de la causalité » (diSessa, 2014, p. 803). Enfin, le modèle de diSessa ne prône pas *per se* l'usage du conflit cognitif, mais suggère plutôt l'utilisation de manipulations, d'observations et l'activation des p-prims dans une variété de contextes afin de favoriser leur réorganisation. Compte tenu qu'il est davantage descriptif et que certains de ses postulats sont plutôt difficiles à bien saisir, il est cependant difficile de déterminer si ce modèle adhère davantage à la séquence longitudinale A ou B.

2.2.4.7 Modèle de Bélanger (2008)

Dans son modèle, Bélanger (2008) met l'accent sur la cohabitation de la conception alternative et du concept scientifique au sein de la structure cognitive de l'apprenant. Cet auteur s'inscrit ainsi ostensiblement dans la perspective de la coexistence et insiste sur le fait que l'expression « changement conceptuel » ne signifie pas que les conceptions alternatives soient éliminées ou remplacées par les concepts scientifiques normatifs lors du processus de changement conceptuel. Il explique plutôt que la conception et le concept scientifique ont tous les deux une validité explicative qui dépend du contexte, en écrivant notamment qu'il existe « une sorte de cohabitation entre la conception spontanée initiale et la conception scientifique, chacune ayant alors son propre domaine de validité » (Bélanger, 2008, p.4). La conception et le concept scientifique forment ainsi deux systèmes explicatifs parallèles qui se retrouvent en compétition et sont « à la fois différents, concurrents et complémentaires » (Bélanger, 2008, p. 13).

Une autre particularité du modèle de Bélanger est le fait que cet auteur emploie l'expression de *complexification conceptuelle* pour désigner le processus du changement conceptuel. La complexification conceptuelle renvoie, dans ce modèle, à une vision non isolationniste de restructuration des conceptions alternatives initiales et des concepts scientifiques appris. Cette complexification consiste ainsi dans la coordination entre plusieurs conceptions et concepts et dans leur intégration au sein d'une structure cognitive élaborée, plus riche que la somme des conceptions et concepts pris isolément (Bélanger, 2008). Bélanger souligne également l'importance de différents types de structures cognitives intermédiaires permettant de réaliser cette coordination et cette intégration. Un exemple de ces structures sont les structures descriptives, qui permettent une comparaison du contenu de deux conceptions ou d'une conception et d'un concept. Enfin, le modèle de Bélanger emploie l'unité d'analyse la plus traditionnelle pour expliquer le processus de changement

conceptuel, soit la *conception* et le *concept*. La taille de l'unité d'analyse considérée par Bélanger est ainsi, notamment, plus grande que les p-primis considérées par diSessa, mais plus petite que les cadres théoriques naïfs considérées par Vosniadou et Brewer. Toutefois, le modèle de Bélanger ne fournit pas clairement de prescriptions pédagogiques pour favoriser la complexification conceptuelle et est donc davantage de type descriptif. En outre, certains postulats de ce modèle sont difficiles à saisir. Par conséquent, tout comme pour le modèle de diSessa, il devient dès lors difficile de déterminer si le modèle de Bélanger adhère davantage à la séquence longitudinale A ou B.

2.2.4.8 Modèle d'Ohlsson (2009, 2013)

Le modèle d'Ohlsson (2009, 2013) postule que la théorie de la « resubsumption » explique le changement conceptuel. Une « resubsumption » peut se définir comme le transfert de théories explicatives à partir d'un domaine du savoir vers un autre. Elle survient au moyen de trois processus cognitifs subséquents. Le premier processus consiste en la formation routinière, au quotidien, de nouveaux savoirs dans la structure cognitive d'un apprenant. Durant cette formation routinière de savoirs, l'apprenant développe des théories informelles ayant chacune un certain pouvoir explicatif dans un domaine particulier (domaine A), mais la cohérence globale de ce système explicatif reste faible ou nulle. Le deuxième processus, la *bisociation*, consiste en la réalisation, par l'apprenant, qu'une théorie informelle développée pour faire du sens dans le domaine A peut également s'appliquer à un autre domaine (domaine B). Ainsi, dans ce domaine B, l'apprenant possède désormais au moins deux théories explicatives pouvant avoir du sens. Le troisième processus consiste en un conflit entre les théories explicatives détenues par l'apprenant dans le domaine B. Au moyen d'une évaluation compétitive de l'utilité cognitive de ces théories, l'apprenant résout éventuellement ce conflit et adopte l'une parmi ces théories

explicatives comme étant la théorie explicative favorisée dans le domaine B. Un exemple illustrant une « resubsumption » consiste dans les théories expliquant la production d'anticorps toujours spécifiquement antigéniques par le système immunitaire humain pour combattre les microbes. En effet, l'évolution et l'adaptation des anticorps aux microbes sont sous-tendues par des théories explicatives comme la variation génétique et la sélection naturelle, provenant des lois de la génétique de Darwin (Gazzinga, 1992). Ces théories explicatives ont ainsi été transférées ou « resubsumées » du domaine de la génétique vers celui de l'immunologie. En somme, le modèle d'Ohlsson s'inscrit davantage dans la perspective de la coexistence et utilise une unité d'analyse de plus grande taille que la conception, soit la *théorie*. Bien que le modèle d'Ohlsson soit prudent en termes de prescriptions pédagogiques et qu'il ne fournisse pas clairement de pistes pédagogiques à appliquer, il ressort néanmoins de la séquence en trois étapes décrite précédemment que son auteur adhère davantage à la séquence longitudinale B plutôt que A.

2.2.4.9 Modèle de Potvin (2013), Potvin et Cyr (2017a, 2017b), Potvin, Masson, Lafortune et Cyr (2015)

Le dernier modèle discuté ici sera le modèle de la *prévalence conceptuelle* de Potvin, décrit dans Potvin (2013), Potvin *et al.* (2015) ainsi que dans Potvin et Cyr (2017a, 2017b). Ce modèle, en plus d'être l'un des plus récents, présente l'avantage de s'appuyer sur une quantité considérable de résultats d'études empiriques, notamment sur les corpus d'études psycho-cognitivistes et neuroscientifiques abordées dans le chapitre précédent de ce mémoire. S'appuyant ainsi, entre autres, sur les résultats de ces études, Potvin et ses collaborateurs insistent sur le fait que les conceptions des élèves ne disparaissent jamais de leur structure cognitive. Le but poursuivi par un enseignement visant un changement conceptuel est, par conséquent, de rendre les concepts scientifiques plus prévalents que les conceptions dans la structure cognitive des apprenants. Pour ce faire, le modèle de Potvin postule qu'une séquence

longitudinale menant au changement conceptuel devrait être constituée de trois étapes. La première étape consiste à rendre disponible à l'apprenant un concept scientifique nouveau en le lui enseignant explicitement. Cette première étape va visiblement à contre-sens d'autres modèles, dont celui de Posner *et al.* (1982), et s'appuie notamment sur des résultats empiriques (Hynd, McWorther, Phares et William 1994; Potvin *et al.*, 2009) ayant démontré que l'emploi du conflit cognitif pour commencer une séquence longitudinale peut mener à une « contamination cognitive » chez les apprenants qui n'adhéraient pas initialement à la conception alternative.

La deuxième étape du modèle de Potvin consiste à développer chez les apprenants la capacité à inhiber leur tendance à utiliser leur conception alternative pour fournir des explications dans certains contextes. Cette étape s'appuie principalement sur les corpus d'études psycho-cognitivistes et neuroscientifiques ayant conclu à l'importance du contrôle inhibiteur dans la complétion d'un changement conceptuel en sciences mais, également, sur les études déjà abordées (Houdé *et al.*, 2000, 2001) qui ont démontré qu'un entraînement à l'inhibition de stratégies tentantes, mais erronées, était bénéfique pour la réussite de tâches contre-intuitives dans le domaine du raisonnement logique.

Enfin, la troisième étape du modèle de Potvin consiste à sécuriser, chez les apprenants, une prévalence durable du concept scientifique, notamment au moyen de la répétition des deux premières étapes afin de créer une automatisation de l'utilisation du concept scientifique au profit de la conception alternative. Le modèle de Potvin considère donc l'unité d'analyse la plus traditionnelle, soit la *conception*, et proscrit le conflit cognitif comme étape initiale du changement conceptuel, bien qu'il reconnaisse une utilité potentielle au conflit cognitif dans le cadre de la deuxième étape visant à diminuer la prévalence de la conception alternative. Par conséquent, ce modèle, à plus forte raison que le modèle d'Ohlsson, est clairement de nature

davantage prescriptive et recommande explicitement la séquence longitudinale B plutôt que A.

Cette section a brièvement décrit quelques-uns des principaux modèles de changement conceptuel afin d'en ressortir les points de convergence et de divergence. En particulier, il ressort de ce qui précède qu'un point de divergence majeur entre les modèles est la séquence longitudinale optimale (A vs B) à travers laquelle un apprenant des sciences doit passer afin de compléter un changement conceptuel. En outre, tel qu'il ressort du modèle récent de Potvin, les résultats obtenus par des études psycho-cognitivistes et neuroscientifiques qui ont examiné le processus de changement conceptuel commencent à être intégrés dans l'élaboration de nouvelles théories concernant le changement conceptuel. Il convient ici de rappeler que l'une de ces principales théories, telle que décrite dans le modèle de Potvin, concerne l'importance du mécanisme de contrôle inhibiteur dans le processus de changement conceptuel.

2.3 Mécanisme de contrôle inhibiteur

2.3.1 *Contrôle inhibiteur* et son sens

À un niveau d'analyse cognitif, le mécanisme de contrôle inhibiteur peut être défini comme étant l'habileté cognitive à résister et à supprimer une habitude, une stratégie ou une réponse spontanée et tentante, mais qui correspond en fait à un comportement ou à une information inappropriée dans un contexte donné (Borst *et al.*, 2013; Dempster et Corkill, 1999; Friedman et Miyake, 2004; Houdé, 2014; Houdé *et al.*, 2011; Houdé et Borst, 2014; Nigg, 2000). À un niveau d'analyse cérébral, ce mécanisme peut se définir comme la capacité d'un réseau neuronal à empêcher, au moyen d'influx nerveux inhibiteurs, l'activation d'un autre réseau neuronal qui serait

autrement activé (Hunter *et al.*, 2011; Masson *et al.*, 2014). Squire *et al.* (2003) fournissent quant à eux une définition combinée neuro-cognitiviste du mécanisme de contrôle inhibiteur, en le considérant comme étant la suppression de l'activité cérébrale dans un groupe de neurones, responsables d'une fonction cognitive, causée par un autre groupe de neurones. Le contrôle inhibiteur est généralement considéré comme faisant partie d'un groupe de fonctions d'ordre supérieur, dites *fonctions exécutives*. Ces fonctions, en plus du contrôle inhibiteur, comprennent également des fonctions comme la mémoire de travail, la prise de décision, la planification, l'initiative, ou la flexibilité mentale (Funahashi, 2001; Miyake *et al.*, 2000; Miyake et Friedman, 2012). Les fonctions exécutives sont responsables d'accomplir des tâches cognitives complexes, comme résoudre des problèmes de tous genres, modifier son comportement à la lumière de nouvelles informations ou objectifs, ou générer de nouvelles stratégies dans une situation donnée (Elliott, 2003). Ce dernier auteur (Elliott, 2003, p. 50) souligne en outre que, lorsque les fonctions exécutives sont déficientes, comme dans le cas d'une démence, le comportement peut devenir erratique et désinhibé : « When these systems break down, behaviour becomes poorly controlled, disjointed and disinhibited ». Similairement, Houdé (2004) définit le concept de fonction exécutive comme étant une fonction du cerveau permettant de contrôler l'exécution des conduites et, lorsque la situation l'impose, de prendre des décisions stratégiques. Enfin, Garavan *et al.* (2002, p. 1820) soulignent l'importance des fonctions exécutives dans la cognition et le comportement humains en ces termes :

Executive functions are critical for flexible interaction with changing task or environmental conditions and their compromise, often labeled dysexecutive syndrome, has been implicated following brain injury and in clinical conditions such as schizophrenia, ADHD [...]

À ce dernier égard, une quantité considérable d'études ont établi une corrélation entre une capacité de contrôle inhibiteur déficiente et le trouble de déficit de l'attention

avec ou sans hyperactivité et impulsivité, aussi connu sous l'acronyme de TDA/H (Diamond, 2006; Wodka *et al.*, 2007). L'échelle de Conners, la plus utilisée dans le dépistage et le diagnostic de ce trouble, comprend d'ailleurs différentes sous-échelles mesurant non seulement l'inattention, l'hyperactivité et l'impulsivité, mais également les fonctions exécutives du patient, dont sa capacité de contrôle inhibiteur (Sirois, Sirois, Proulx et Lemelin, 2013).

2.3.2 Régions cérébrales associées au contrôle inhibiteur

Les études neuroscientifiques des vingt dernières années ont permis de mieux connaître les fonctions cognitives associées aux différentes régions cérébrales. Afin de déterminer avec précision le lien entre régions cérébrales et fonctions cognitives, ces études ont eu besoin d'utiliser deux éléments. Le premier consiste en des tâches neuropsychologiques permettant d'isoler spécifiquement la fonction cognitive souhaitée. Le deuxième consiste en l'utilisation d'une technique d'imagerie cérébrale permettant d'observer l'activité cérébrale des individus pendant l'exécution de cette tâche. Ainsi, plusieurs études ont visé à déterminer les régions cérébrales associées au contrôle inhibiteur en ayant recours à des tâches spécifiques nécessitant cette fonction cognitive particulière. Une première caractéristique commune à ces tâches est que les participants doivent fournir des réponses alors que leur activité cérébrale est mesurée. Une deuxième caractéristique commune est l'utilisation de stimuli interférents qui correspondent à une stratégie ou à une réponse tentante, mais erronée. Ces stimuli visent ainsi à causer un phénomène d'interférence cognitive chez le participant et l'obliger à résister à sa tendance spontanée à fournir une réponse tentante, mais erronée. Plusieurs types de ces tâches ont été utilisés par les études neuroscientifiques. Trois de ces tâches les plus abondamment utilisées par la recherche sont la tâche du Go/No-go, du Stroop et du Wisconsin Card Sorting Test (WCST).

2.3.2.1 Tâche du Go/No-go

Dans la forme classique de la tâche du Go/No-go (Donders, 1868/1969), une série de lettres de l'alphabet défilent sur un écran placé devant le participant. Le participant doit appuyer sur un bouton lorsqu'il aperçoit à l'écran n'importe quelle lettre de l'alphabet (Condition Go), mais doit se retenir d'appuyer sur le bouton lorsqu'il aperçoit à l'écran la lettre X (Condition No-go). Il s'agit donc d'une prise de décision binaire. Puisque la lettre X n'apparaît à l'écran qu'une fois de temps en temps, le participant devient habitué à appuyer sur le bouton. Lorsqu'un X apparaît à l'écran, le participant doit donc inhiber sa tendance spontanée à continuer à appuyer sur le bouton. Plusieurs variantes de la tâche existent dans la littérature scientifique. Elles consistent notamment en l'utilisation d'autres types de stimuli que des lettres, comme des formes géométriques (p. ex. : Watanabe *et al.*, 2002), des chiffres (p. ex. : Fassbender *et al.*, 2004), différents objets de la vie courante (p. ex. : Mostofsky *et al.*, 2003; Rubia *et al.*, 2001) ou des images de personnes (p. ex. : Ferrey, Frischen et Fenske, 2012).

Plusieurs études neuroscientifiques ont utilisé la tâche du Go/No-go et une technique de neuroimagerie pour observer l'activité cérébrale des participants pendant l'exécution de cette tâche. Par exemple, Menon *et al.* (2001) ont utilisé l'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle (IRMf) afin de mesurer l'activité cérébrale d'un groupe de 14 participants âgés de 17 à 41 ans lors de l'exécution de la version classique du Go/No-go. L'analyse par contraste de l'activité cérébrale des participants dans la condition No-go (c.-à-d. : condition expérimentale), en comparaison à la condition Go (c.-à-d. : condition contrôle), a permis d'observer une activation significativement plus importante dans trois régions cérébrales : (1) le cortex cingulaire antérieur ou CCA, correspondant dans la nomenclature de Brodmann aux aires 24 et 32 (BA 24/32); (2) le cortex préfrontal dorsolatéral (CPDL, BA 9/46) et le cortex préfrontal ventrolatéral (CPVL, BA 45/47). Ultérieurement, des résultats

similaires ont été obtenus par une étude de Wager *et al.* (2005). Cette étude a également utilisé l'IRMf afin de mesurer l'activité cérébrale d'un groupe de 14 étudiants universitaires âgés entre 18 et 25 ans lors de l'exécution, encore une fois, de la version classique du Go/No-go. Le même contraste que celui décrit ci-dessus pour l'étude de Menon *et al.* a permis d'observer une activation du CCA (BA 32) et du CPDL (BA 9/46). D'autres études empiriques ont triangulé ces résultats en observant une activation du CCA, du CPDL et du CPVL dans la tâche du Go/No-go et de ses variantes (p. ex. : Fassbender *et al.*, 2004; Liddle, Kiehl et Smith, 2001; Rubia *et al.*, 2001). Ainsi, ces études suggèrent que le CCA, le CPDL et le CPVL sont des régions cérébrales fortement recrutées par les situations No-go de la tâche du Go/No-go, c'est-à-dire lorsque les participants doivent faire preuve de contrôle inhibiteur. Enfin, des méta-analyses (p. ex. : Buchsbaum, Greer, Chang et Berman, 2005; Simmonds, Pekar et Mostofsky, 2008) ayant examiné les activations cérébrales durant la tâche du Go/No-go ont confirmé le rôle joué par ces trois régions dans la condition No-go.

2.3.2.2 Tâche de Stroop

La tâche de Stroop est associée à l'effet de Stroop, découvert de façon fortuite en 1935 par le psychologue américain John Ridley Stroop (Stroop, 1935, cité dans Laird *et al.*, 2005). La tâche de Stroop traditionnelle consiste à demander à des participants d'identifier la couleur d'une série de mots sans lire les mots eux-mêmes. La particularité de cette tâche réside dans le fait que les mots sont cependant des noms de couleurs, créant ainsi une interférence cognitive lors de l'exécution de la tâche. Sur le plan comportemental, Stroop a ainsi remarqué que le temps de réaction, à savoir le temps nécessaire pour identifier la couleur d'un mot donné dans la série, est significativement plus long lorsqu'il y a incongruence entre le mot et la couleur (p. ex. : le mot *rouge* écrit en caractères bleus) que lorsqu'il y a congruence (p. ex. : le mot *rouge* écrit en caractères rouges). Une autre constatation de Stroop lors de

l'exécution de cette tâche est à l'effet que le pourcentage d'erreurs est plus élevé lors des situations d'incongruence en comparaison avec les situations de congruence. Par conséquent, afin de fournir une réponse correcte lors des situations incongruentes, le participant doit inhiber l'élément interférent, à savoir sa tendance à répondre en fonction de la lecture du mot lui-même plutôt que de sa couleur. Tout comme la tâche du Go/No-go, de nombreuses variantes de la tâche de Stroop utilisant d'autres types de stimuli existent dans la littérature, comme le Stroop numérique (p. ex. : Fan, Gau et Chou, 2014; Posner *et al.*, 2011) ou le Stroop animal, qui est employé surtout avec des enfants (p. ex. : Bryce, Szűcs, Soltész et Whitebread, 2011; Ikeda, Okuzumi et Kokubun, 2014).

À l'instar de la tâche du Go/No-go, plusieurs études neuroscientifiques ont utilisé la tâche de Stroop et une technique de neuroimagerie pour observer l'activité cérébrale de participants pendant l'exécution de cette tâche. Par exemple, l'une des premières recherches à ce sujet est celle de Pardo, Pardo, Janer et Raichle (1990), qui ont utilisé la tomographie par émission de protons (PET) afin de mesurer l'activité cérébrale de 8 participants âgés de 18 à 40 ans lors de l'exécution de la tâche de Stroop classique. L'analyse par contraste de l'activité cérébrale des participants lorsqu'ils répondaient à des situations incongruentes (c.-à-d. : mot différent du nom de la couleur), en comparaison aux situations congruentes (c.-à-d. : mot identique au nom de la couleur), a permis d'observer une activation significativement plus importante dans le cortex cingulaire antérieur (CCA). Ultérieurement, une étude de Bush *et al.* (1998) a utilisé l'IRMf pour examiner l'activité cérébrale de 9 participants (âge moyen = 24 ans) lors de l'exécution d'une variante de la tâche de Stroop, soit le Stroop numérique. Dans cette tâche, le principe reste le même que dans la tâche traditionnelle, mais les stimuli visuels consistent plutôt en des mots représentant soit des animaux (p. ex. : *dog*), soit des chiffres (p. ex. : *two*). Dans les deux cas, les participants avaient à identifier le nombre d'éléments se trouvant à l'écran. Dans la situation congruente, les éléments consistaient en des mots représentant des animaux,

alors que dans la situation incongruente, les éléments représentaient plutôt des noms de chiffres, causant ainsi une interférence cognitive. L'analyse par contraste de l'activité cérébrale des participants a permis d'observer, similairement à l'étude précédente, une activation significativement plus importante du CCA dans les situations incongruentes en comparaison avec celles congruentes. En plus du CCA, d'autres régions étaient également significativement plus activées dans la condition incongruente, notamment le cortex préfrontal dorsolatéral (CPDL) droit et gauche. En outre, sur le plan comportemental, un taux d'exactitude significativement plus bas et un temps de réaction significativement plus élevé ont été observés dans les réponses des participants pour les situations incongruentes.

Ces résultats ont été répliqués par quantité d'autres études, qui ont utilisé soit la variante traditionnelle de la tâche de Stroop (p. ex. : Leung *et al.*, 2000; Vendrell *et al.*, 1995; Zysset, 2001), soit diverses variantes de celle-ci (p. ex. : MacDonald, Cohen, Stenger et Carter, 2000; Milham, Banich et Barad, 2003; Milham *et al.*, 2002). Bon nombre de ces études ont également observé, en plus de l'activation du CCA et du CPDL, une activation plus grande du CPVL dans la condition incongruente (p. ex. : Fan *et al.*, 2014; Leung *et al.*, 2000). Ainsi, ces études suggèrent que le CCA, le CPDL et le CPVL sont des régions cérébrales fortement recrutées par les situations incongruentes de la tâche de Stroop, c'est-à-dire lorsque les participants doivent faire preuve de contrôle inhibiteur. Des méta-analyses (p. ex. : Derrfuss, Brass, Neumann et von Cramon, 2005; Laird *et al.*, 2005) ayant examiné les activations cérébrales durant la tâche de Stroop et ses variantes ont d'ailleurs confirmé le rôle joué par ces trois régions dans la condition incongruente.

2.3.2.3 Tâche du Wisconsin Card Sorting Test (WCST)

La tâche du Wisconsin Card Sorting Test (Grant et Berg, 1948) consiste en une série d'appariements de cartes. Les cartes peuvent toutefois différer selon trois critères, à savoir selon le type de motif présent sur la carte (c.-à-d. : carré, croix, étoile ou triangle), selon la couleur du motif (c.-à-d. : bleu, jaune, rouge ou vert), ou selon le nombre d'éléments composant ce motif (c.-à-d. : de 1 à 4). Lors de l'exécution de la tâche, les participants se voient attribuer une carte qu'ils doivent appairier à l'une parmi quatre autres cartes qui constituent des choix de réponses. L'appariement peut donc se faire selon trois règles possibles, à savoir un appariement par motif, par couleur, ou par nombre d'éléments. La règle n'est toutefois jamais fournie aux participants, ceux-ci devant ainsi la choisir eux-mêmes. De la rétroaction, positive ou négative, leur est fournie après chaque appariement afin de leur indiquer si leur appariement était correct ou incorrect et, suivant cette rétroaction, les participants doivent inférer s'ils avaient opté pour la bonne règle d'appariement, ou si celle-ci doit être modifiée en vue du prochain appariement. La même règle est maintenue pour la durée de quelques appariements consécutifs, mais cette règle est éventuellement modifiée par une autre. La modification de la règle oblige ainsi les participants, afin de répondre correctement, à mobiliser leur mécanisme de contrôle inhibiteur afin de résister à leur tendance à répondre en fonction de la règle qui était précédemment correcte et qui est devenue une habitude spontanée.

Plusieurs études neuroscientifiques ont utilisé la tâche de Wisconsin et une technique de neuroimagerie afin d'observer l'activité cérébrale des participants lors de l'exécution de cette tâche. Par exemple, Monchi *et al.* (2001) ont utilisé l'IRMf afin d'observer l'activité cérébrale d'un groupe de 11 participants (âge moyen = 24 ans) pendant l'exécution de cette tâche. Leur activité cérébrale, pendant l'exécution de la tâche de Wisconsin, était mesurée à différents moments, notamment suivant la réception de rétroaction négative après un appariement incorrect, moment qui

correspond à la mobilisation du mécanisme de contrôle inhibiteur. L'activité cérébrale mesurée à ce moment précis a ensuite été comparée, par une analyse de contraste, à une condition contrôle consistant à appairer des cartes identiques et ne nécessitant donc pas d'inhibition. Cette analyse a permis d'observer que les trois mêmes régions que celles décrites précédemment, soit le CCA, le CPDL et le CPVL, étaient significativement plus activées après la réception de rétroaction négative, en comparaison avec la condition contrôle. Ultérieurement, Lie, Specht, Marshall et Fink (2006) ont similairement utilisé l'IRMf et la tâche de Wisconsin pour observer l'activité cérébrale d'un groupe de 12 participants, âgés de 19 à 36 ans, lors de différents moments de l'exécution de la tâche, en comparaison avec la condition contrôle consistant à appairer des cartes identiques. L'analyse effectuée a été la même que celle précédemment décrite pour l'étude de Monchi *et al.* (2001). Quant aux résultats obtenus, ils ont également été similaires et ont permis d'observer une activation significativement plus importante dans le CCA et le CPDL suivant la réception de rétroaction négative. En outre, dans l'étude de Lie *et al.* (2006), un taux d'exactitude significativement plus bas et un temps de réaction significativement plus long ont été observés après la réception de rétroaction négative, alors que les participants devaient inhiber leur tendance à répondre en appliquant l'ancienne règle d'appariement.

Ces résultats, concluant au rôle central du CCA, du CPDL et du CPVL, ont de plus été répliqués par une quantité significative d'autres études neuroscientifiques ayant examiné l'activité cérébrale durant l'exécution du WCST au moyen de la magnétoencéphalographie ou MEG (p. ex. : Wang, Kakigi et Hoshiyama, 2001), du PET (p. ex. : Nagahama *et al.*, 1996) ou de l'IRMf (p. ex. : Braver, Reynolds et Donaldson, 2003; Konishi, Kawazu *et al.*, 1999; Konishi, Nakajima *et al.*, 1999). Ainsi, ces études suggèrent que le CCA, le CPDL et le CPVL sont des régions cérébrales fortement recrutées par les situations de la tâche de Wisconsin où les participants doivent inhiber une règle d'appariement devenue une habitude spontanée.

Enfin, l'imposante méta-analyse de Buchsbaum *et al.* (2005, p. 35), portant sur l'ensemble de ce corpus d'études, a confirmé ces observations en concluant en ces mots : « The WCST was associated with extensive bilateral clusters of reliable cross-study activity in the lateral prefrontal cortex and anterior cingulate cortex. »

Les résultats des études discutées ci-dessus permettent de définir de façon opérationnelle le contrôle inhibiteur au moyen de ses manifestations observables autant aux niveaux comportemental que cérébral. Ainsi, dans ce texte, le contrôle inhibiteur est défini au niveau comportemental comme étant un mécanisme cognitif de haut niveau qui se manifeste, dans une condition nécessitant de l'inhibition, par un temps de réaction significativement plus long et par un taux d'exactitude significativement plus bas en comparaison avec une condition ne nécessitant pas d'inhibition. Au niveau cérébral, le contrôle inhibiteur est défini comme étant un mécanisme cérébral qui se manifeste par l'activation du CCA, du CPDL et du CPVL. De plus, au niveau cérébral, cette définition doit également tenir compte du fait que la littérature neuroscientifique a apporté une distinction significative entre les rôles respectifs de ces trois régions dans le mécanisme de contrôle inhibiteur. Ainsi, chacune de ces trois régions est associée à un sous-mécanisme cognitif sous-tendant le contrôle inhibiteur. Le CCA est associé à (1) la détection d'une réponse, information, habitude, ou stratégie erronée ainsi qu'à (2) la gestion du conflit cognitif engendré par des informations contradictoires, comme une conception alternative versus un concept scientifique correspondant (Botvinick, 2007; Botvinick, Cohen et Carter, 2004; Botvinick *et al.*, 2001). Le CPDL est associé à la mémoire de travail et, plus précisément, est impliqué dans la comparaison et dans la sélection de différentes réponses ou stratégies possibles (Petrides, 2005; Rowe *et al.*, 2000). Enfin, le CPVL est associé à l'implémentation *per se* du mécanisme de contrôle inhibiteur suivant les deux sous-mécanismes précédents (Aron, Robbins et Poldrack, 2004; De Neys, Vartanian et Goel, 2008; Van Veen et Carter, 2002; Yeung, Botvinick, et Cohen, 2004).

2.3.3 Contrôle inhibiteur dans le changement conceptuel en sciences

Les résultats des études précédentes ont démontré que deux types de données peuvent servir à opérationnaliser le mécanisme cognitif de contrôle inhibiteur, soit : (1) les données comportementales, à savoir le temps de réaction et le taux d'exactitude dans les réponses; (2) les données cérébrales, à savoir l'activation de régions cérébrales observée par une technique de neuroimagerie. Tel que déjà abordé dans le chapitre précédent du présent mémoire, un corpus d'études psycho-cognitivistes et neuroscientifiques substantiel a utilisé l'un ou l'autre de ces deux types de données afin d'étudier le processus de changement conceptuel en sciences. Afin de poser les hypothèses de la présente étude et de définir sa méthodologie, la dernière partie de ce chapitre consistera donc à effectuer une revue de littérature plus détaillée de ce corpus d'études psycho-cognitivistes et neuroscientifiques.

2.3.3.1 Études psycho-cognitivistes sur le changement conceptuel

Comme expliqué dans le chapitre précédent, les études psycho-cognitivistes s'étant intéressées au changement conceptuel en sciences peuvent se catégoriser en sous-corpus d'études qui ont employé le même type de méthodologie et de participants. De plus, les études de chaque sous-corpus sont arrivées à des résultats similaires. Conséquemment et par souci de concision, la présente revue de littérature ne présentera en détail que l'étude la plus citée de chacun de ces sous-corpus.

L'une des premières études à démontrer l'importance du mécanisme de contrôle inhibiteur dans l'apprentissage des sciences est une étude pionnière appartenant au sous-corpus d'études corrélationnelles, soit l'étude de Kwon et Lawson (2000). Ces chercheurs visaient à déterminer l'existence ou non d'une corrélation entre l'efficacité des fonctions exécutives chez les élèves du secondaire et leur aptitude à

apprendre des concepts de physique contre-intuitifs. Pour ce faire, un échantillon de 210 élèves, âgés entre 13 et 16 ans, a été sélectionné. Trois tests ont été administrés à ces participants à deux moments, soit avant et après une période d'instruction de 14 semaines portant sur des concepts physiques associés à la pression de l'air. Le premier test mesurait, chez les participants, diverses habiletés cognitives appartenant à la famille des fonctions exécutives, notamment le contrôle inhibiteur qui était entre autres mesuré par la tâche de Wisconsin. Le second test mesurait l'habileté des participants à raisonner scientifiquement et s'appuyait sur des tâches de raisonnement piagétien, comme le raisonnement proportionnel et combinatoire. Enfin, le troisième test mesurait leurs connaissances par rapport à des concepts contre-intuitifs en lien avec la pression de l'air (p. ex. : « *When you heat a hot air balloon from below, the balloon rises. Explain why heating causes the balloon to rise* »). Le résultat le plus notable de cette étude est à l'effet que la performance des participants aux tâches de contrôle inhibiteur était le prédicteur le plus significatif du gain d'apprentissage conceptuel réalisé par les participants entre le pré-test et le post-test. En effet, la capacité de contrôle inhibiteur expliquait 29,3 % de la variance du gain d'apprentissage conceptuel.

Ultérieurement, une autre étude (Lombrozo, Kelemen et Zaitchik, 2007), appartenant au sous-corpus d'études s'étant intéressées aux patients âgés souffrant de démence, a également obtenu des résultats pointant dans le même sens. Cette étude a comparé les types de jugements explicatifs fournis par deux groupes de participants concernant diverses relations causales retrouvées dans la nature. Pour ce faire, trois groupes de participants ont été sélectionnés, soit 12 jeunes adultes (âge moyen = 21 ans), 12 personnes âgées ne souffrant d'aucun indice de déclin cognitif (âge moyen = 73 ans) et 17 personnes âgées (âge moyen = 84 ans) souffrant cliniquement de démence de type Alzheimer. Un questionnaire verbal a été administré aux participants, consistant en 10 items ayant chacun deux choix de réponses possibles, l'un correspondant à une explication mécanique, scientifiquement correcte, et l'autre correspondant à une

explication non scientifique pouvant être qualifiée de créationniste, téléologique ou animiste. Chacun des items débutait par « Pourquoi » et portait sur une relation causale. Par exemple, l'énoncé d'un item demandait « *Why is the sun so bright?* » avec les deux choix de réponse possibles « *Because the chemical reactions on the sun produce light* » ou « *So that animals and plants have enough light to survive* ». Le résultat le plus saillant de cette étude est à l'effet que les participants âgés souffrant de déclin cognitif fournissaient significativement davantage de jugements explicatifs téléologiques en comparaison avec les deux autres groupes. En effet, les patients âgés souffrant de démence ont choisi une explication téléologique 87 % du temps, ce qui était significativement plus que les jeunes adultes (66 %) et que les personnes âgées en bonne santé cognitive (73 %). Les auteurs ont donc conclu que les relations causales créationnistes, téléologiques ou animistes semblent demeurer dans les structures cognitives des individus durant toute leur vie et coexistent avec les relations causales scientifiques. Ces relations causales primitives, également très présentes chez les jeunes enfants, resurgissent donc dans le discours des patients souffrant de démence à cause de leur incapacité à les inhiber. Cette conclusion est en outre appuyée par d'autres études qui démontrent que les jeunes enfants répondent systématiquement en conformité avec ces mêmes relations causales créationnistes (Kelemen, 1999a, 1999b, 1999c, 2004; Kelemen et deYanni, 2005). Une autre étude appartenant au même sous-corpus, soit celle de Zaitchik et Solomon (2008), a conclu de façon similaire que des participants âgés atteints de la maladie d'Alzheimer ($N = 24$) présentaient une régression vers une pensée téléologique ou animiste à cause de leur dysfonctionnement exécutif. Cette étude a de plus démontré que la proportion de réponses téléologiques augmentait avec le degré d'avancement de la maladie.

Le troisième sous-corpus est constitué d'études s'étant intéressées à des étudiants avancés dans leur scolarité et ayant bénéficié de plusieurs cours de sciences, sans toutefois être considérés comme des experts en sciences. L'étude la plus citée au sein de ce sous-corpus est celle de Shtulman et Valcarcel (2012). Cette étude a utilisé un

échantillon de 150 étudiants universitaires en psychologie ayant suivi en moyenne 3,1 cours de mathématiques ou de sciences de niveau universitaire. L'objectif était de comparer la performance et le temps de réaction de ces étudiants lors de la vérification (Vrai/Faux) de la scientificité de 200 énoncés concernant divers phénomènes naturels dans 10 disciplines scientifiques différentes (p. ex. : astronomie, génétique, mécanique, thermodynamique, etc.). Ces énoncés étaient de deux types. Le premier type consistait en des énoncés congruents, vrais autant selon le point de vue de la conception alternative que selon le point de vue scientifiquement admis (p. ex. : « La Lune tourne autour de la Terre »). Le deuxième type consistait en des énoncés incongruents ou contre-intuitifs, vrais selon le point de vue de la conception alternative, mais faux selon le point de vue scientifiquement admis (p. ex. : « Le Soleil tourne autour de la Terre »). Les résultats les plus saillants sont à l'effet que les participants ont commis significativement davantage d'erreurs lors de la vérification des énoncés incongruents, par rapport à celle des énoncés congruents. En outre, le temps de réaction des participants était significativement plus long lors de la vérification des énoncés incongruents. La conclusion des auteurs est ainsi similaire à celle des études précédentes. Sans utiliser explicitement le terme *inhibition*, les auteurs écrivent néanmoins que leurs résultats démontrent que « naïve theories are *suppressed* by scientific theories but not supplanted by them ».

Par ailleurs, des résultats similaires ont été obtenus par d'autres études de ce sous-corpus, notamment par Babai et Amsterdamer (2008) avec des concepts concernant les propriétés de la matière ainsi que par Babai, Sekal et Stavy (2010) avec des concepts concernant les propriétés des vivants. À la différence de Shtulman et Valcarcel (2012), Babai *et al.* (2010, p. 25) ont cependant explicitement conclu à la mobilisation du mécanisme de contrôle inhibiteur lorsque les participants devaient vérifier des items incongruents : « This conflict must be resolved by overcoming the interference, a demanding process that takes time and might involve activation of inhibitory cognitive control mechanisms. » Enfin, plusieurs autres études, dont le type

de méthodologie et de participants est similaire à ce sous-corpus, sont arrivées aux mêmes résultats et conclusions dans le domaine des mathématiques, notamment avec des concepts contre-intuitifs en géométrie (Babai *et al.*, 2012; Babai, Levyadun *et al.*, 2012; Stavy et Babai, 2008, 2010) et en raisonnement probabiliste (Babai, Brecher *et al.*, 2006).

Plus récemment, Shtulman et Harrington (2016) ont répliqué une nouvelle fois ces résultats en plus d'apporter un élément de connaissance nouveau. Cette étude a utilisé deux groupes : (1) un groupe de 104 étudiants universitaires en psychologie (âge moyen = 19,6 ans) ayant suivi en moyenne 3,6 cours de sciences ou mathématiques de niveau universitaire et (2) un groupe de 48 adultes âgés, constitué d'adultes âgés recrutés dans la communauté ($N = 27$), de professeurs d'université en sciences humaines ($N = 11$) et de professeurs d'université en sciences ($N = 10$). L'étendue des âges des adultes de cette étude variait entre 50 et 87 ans et ils avaient suivi en moyenne 6,5 cours de sciences ou mathématiques de niveau universitaire. La tâche utilisée était la même que celle de Shtulman et Valcarcel (2012). Sur le plan de l'exactitude dans les réponses, autant les étudiants universitaires que les adultes âgés ont significativement moins bien performé pour les stimuli incongruents ($p < ,001$). Sur le plan du temps de réaction, autant les étudiants universitaires que les adultes âgés ont été significativement plus lents pour évaluer les stimuli incongruents en comparaison avec les stimuli congruents. Quant au résultat particulier de cette étude apportant un élément de connaissance nouveau par rapport à l'étude de Shtulman et Valcarcel de 2012, il est à l'effet que les adultes âgés ont été significativement plus lents que les étudiants pour évaluer les deux types de stimuli. En outre, la différence « temps réaction_{incongruent} – temps réaction_{congruent} » était plus grande pour les adultes âgés (0,69 s) par rapport aux étudiants (0,36 s), amenant les auteurs à conclure en ces mots (p. 131) :

[...] the lag in response times between intuition-consistent and intuition-inconsistent statements did not diminish with age; if anything, it increased. And this lag was evident not only among adults in non-scientific occupations, but also among professional scientists with three to four decades of career experience [...] older adults are no more immune to the conflict between science and intuition than are younger adults.

Les résultats obtenus au sein d'un autre sous-corpus, soit celui des études psychodéveloppementales, pointent également dans le même sens. Notamment, Potvin, Masson, Lafortune et Cyr (2015) ont examiné le taux d'exactitude et le temps de réaction de 128 élèves de 14 et 15 ans (3^e année du secondaire au Québec) qui avaient à déterminer laquelle parmi deux balles présentées à l'écran coulerait davantage que l'autre. Les balles pouvaient être constituées de trois matériaux différents (styromousse, bois, plomb) et être de trois tailles différentes (petite, moyenne, grosse). La conception alternative sous-tendue par cette tâche était à l'effet que « les objets légers flottent, alors que les objets lourds coulent ». Certains stimuli étaient de type incongruent (p. ex. : petite balle de plomb vs grosse balle de styromousse) tandis que d'autres stimuli étaient de type congruent (p. ex. : grosse balle de plomb vs petite balle de styromousse). Concernant le taux d'exactitude, les participants ont moins bien performé lors de l'évaluation de stimuli incongruents en comparaison aux stimuli congruents ($p < ,001$), mais ont néanmoins présenté un taux global de bonnes réponses de 88 %. Les participants ont en outre été significativement plus lents pour évaluer les stimuli incongruents comparativement aux stimuli congruents ($p < ,001$).

Ces résultats méritent d'être mis en comparaison avec une autre étude psychodéveloppementale (Lafortune, 2012; Lafortune *et al.*, 2012) qui a utilisé la même tâche, mais avec des élèves plus jeunes âgés de 8 à 14 ans (3^e année du primaire à 2^e année du secondaire au Québec). Concernant le taux d'exactitude global des participants de l'étude de Lafortune *et al.* (2012), celui-ci croissait progressivement entre la 3^e année du primaire (52,8 %) et la 2^e année du secondaire (68 %). Or, ce

taux demeure inférieur par rapport à celui observé chez les élèves de 3^e secondaire dans l'étude de Potvin, Masson *et al.* (2015), qui était de 88 %. À l'inverse, dans l'étude de Lafortune *et al.* (2012), le temps de réaction moyen pour les stimuli incongruents répondus correctement décroissait progressivement entre la 3^e année du primaire (2 289 ms) et la 2^e année du secondaire (1 636 ms). La mise en comparaison avec l'étude de Potvin, Masson *et al.* (2015) permet de constater que ce décroissement se poursuit chez les élèves de 3^e secondaire, ce même temps de réaction étant de 791 ms. Par conséquent, il est possible de constater une trajectoire développementale d'acquisition du concept scientifique de flottaison des corps. Dans cette trajectoire, l'augmentation du taux de bonnes réponses et le raccourcissement du temps de réaction semblent être une manifestation observable du développement de la capacité à inhiber la conception alternative selon laquelle « les objets légers flottent, alors que les objets lourds coulent ».

Finalement, le dernier sous-corpus est constitué d'études s'étant intéressées spécifiquement à des participants experts en sciences. La plus citée de ces études semble être celle de Kelemen *et al.* (2013). Cette étude s'est notamment intéressée à un groupe de 80 scientifiques professionnels, soit des professeurs universitaires détenteurs d'un doctorat dans une discipline scientifique. L'un des groupes contrôle ($N = 49$) était formé de gens de la communauté qui n'étaient pas des experts en sciences. La tâche à laquelle les participants ont été soumis consistait à vérifier la scientificité (Vrai ou Faux) de 100 énoncés, parmi lesquels 30 énoncés incongruents sous-tendus par une conception alternative de nature téléologique (p. ex. : « *Trees produce oxygen so that animals can breathe.* »). Les participants de chaque groupe ont été assignés aléatoirement à deux conditions, soit (1) aucune limite de temps pour fournir sa réponse ou (2) une limite de temps de 3 200 millisecondes pour fournir sa réponse. Les résultats les plus saillants de cette étude sont à l'effet que le taux d'acceptation moyen (29 %) d'énoncés téléologiques chez les scientifiques professionnels soumis à la limite de temps était presque le double de celui (15 %) des

scientifiques professionnels non soumis à la limite de temps. En outre, bien que significativement inférieur, ce taux d'acceptation de 29 % se rapprochait du taux d'acceptation moyen constaté chez les gens de la communauté non soumis à une limite de temps (47 %). Tel que déjà discuté dans le chapitre précédent, les conclusions des auteurs ont été à l'effet que la contrainte de temps majeure ne permettait pas aux scientifiques professionnels de mobiliser leur mécanisme de contrôle inhibiteur, résultant ainsi en une plus grande acceptation de réponses en conformité avec une conception alternative téléologique. Cette étude a permis de trianguler les résultats d'une étude préalable des mêmes auteurs (Kelemen et Rosset, 2009). Cette étude préalable avait utilisé la même tâche, avec une limite de temps pour répondre, et était parvenue aux mêmes conclusions avec des étudiants universitaires ayant suivi en moyenne 2,5 cours de sciences de niveau universitaire.

2.3.3.2 Études neuroscientifiques sur le changement conceptuel

La première étude connue ayant examiné le changement conceptuel selon un angle neuroscientifique est l'étude pionnière de Dunbar *et al.* (2007). Cette étude pilote visait à examiner l'activité cérébrale associée à l'expertise scientifique en physique mécanique.

Pour ce faire, Dunbar *et al.* ont utilisé l'IRMf afin de comparer l'activité cérébrale d'un groupe de novices en physique à celle d'un groupe d'experts lors de la réalisation d'une tâche. Les novices étaient des étudiants universitaires n'ayant suivi aucun cours de physique ni au niveau secondaire ni au niveau collégial et adhérent, tel que relevé par un test de connaissances conceptuelles, à des conceptions alternatives aristotéliennes. Les experts, pour leur part, étaient des étudiants universitaires ayant suivi au moins cinq cours de physique de niveau collégial ou universitaire et adhérent, tel que relevé par ce même test de connaissances

conceptuelles, aux concepts newtoniens scientifiquement admis. Ainsi, au niveau comportemental, il était considéré que les experts avaient complété avec succès le processus de changement conceptuel. La tâche administrée aux participants consistait à évaluer l'exactitude de deux types de stimuli en appuyant sur des boutons. Le premier type de stimuli, non scientifique, consistait en un film représentant la chute de deux balles de poids différents où la balle la plus lourde chutait plus rapidement, ce qui correspond à une conception alternative fréquente en mécanique. Le deuxième type de stimuli, scientifique, consistait dans le même film, mais représentait les deux balles chutant à la même vitesse. Les résultats les plus notables de cette étude sont à l'effet que l'activité cérébrale des experts, en comparaison avec celle des novices, consistait lors de l'évaluation des stimuli scientifiques et non scientifiques en un recrutement du cortex frontal médial, une région associée selon les auteurs à la récupération de représentations sémantiques préexistantes en mémoire. Également, une autre région, soit le CCA, s'activait chez les experts lors de l'évaluation de stimuli non scientifiques, mais pas lors de l'évaluation de stimuli scientifiques. Or, tel que déjà discuté, cette dernière région est associée à la détection d'erreur et à la gestion du conflit cognitif entre des informations contradictoires, et elle est impliquée dans le mécanisme de contrôle inhibiteur. Par conséquent, les auteurs ont conclu que les experts, en évaluant les stimuli non scientifiques, devaient inhiber leur tendance erronée à répondre en conformité avec la conception alternative, qui était toujours présente dans leurs réseaux neuronaux (ou structure cognitive). Cependant, cette étude de Dunbar *et al.* n'a jamais fait l'objet d'un article scientifique évalué par les pairs. De plus, les détails de la méthodologie employée, comme la taille de l'échantillon, le nombre de chaque type de stimuli, la procédure exacte suivie, ou les types d'analyses effectuées ne sont pas disponibles.

De manière similaire, Nelson, Lizcano, Atkins et Dunbar (2007) ont mené une étude pilote visant à examiner l'activité cérébrale associée à l'expertise scientifique, mais cette fois en chimie. À cette fin, ils ont utilisé l'IRMf pour comparer l'activité

cérébrale de novices ($N = 9$) et d'experts en chimie ($N = 10$) lors de la réalisation d'une tâche. Les novices n'avaient pas suivi de cours de chimie depuis au moins deux ans et ont obtenu un score faible à un test de connaissances conceptuelles, tandis que les experts avaient suivi au moins quatre cours de chimie de niveau collégial et ont obtenu un score élevé à ce même test. La tâche administrée concernait les changements de phase de la matière et consistait à sélectionner, parmi différentes images, celle représentant correctement la structure moléculaire des molécules d'eau après que l'eau eût été portée à ébullition. Alors qu'une image illustre la réponse scientifique, soit une séparation intermoléculaire des molécules d'eau, les autres images sous-tendaient une conception alternative fréquente, soit une séparation intramoléculaire entre les atomes d'hydrogène et d'oxygène de l'eau. Le résultat le plus notable de cette étude est à l'effet que l'activité cérébrale des experts, en comparaison à celle des novices, démontrait un recrutement du cortex préfrontal inférieur gauche. Cependant, cette activation a été attribuée par les auteurs à la récupération d'informations sémantiques emmagasinées en mémoire et donc à la mobilisation de connaissances déclaratives, au lieu d'être attribuée à l'implémentation du contrôle inhibiteur. Par conséquent, les auteurs ont conclu que le patron d'activité cérébrale lié à l'expertise en chimie semble être différent de celui associé à l'expertise en physique mécanique. Ceci pourrait s'expliquer, selon eux, par le fait que les concepts chimiques sont plus abstraits, généralement invisibles durant la vie quotidienne, et sont d'emblée acquis par les apprenants par abstraction mentale. En revanche, les concepts de la physique mécanique sont plus perceptuels, généralement visibles quotidiennement, et sont initialement acquis par les apprenants à travers la perception, donnant ainsi lieu à davantage de conceptions alternatives qu'en chimie. Cependant, à l'instar de l'étude pilote de Dunbar *et al.* (2007), cette étude de Nelson *et al.* n'a pas fait l'objet d'une publication dans une revue scientifique et les détails méthodologiques ne sont pas connus.

Similairement, Masson *et al.* (2014) ont utilisé l'IRMf afin de comparer l'activité cérébrale d'un groupe d'experts en sciences à celle d'un groupe de novices pendant l'exécution d'une tâche en physique électrique. Les novices ($N = 12$) étaient des étudiants dans des baccalauréats en sciences humaines (p. ex. : histoire, politique) n'ayant suivi aucun cours de science optionnel au secondaire et adhérant au modèle alternatif fréquent selon lequel un seul fil est suffisant pour qu'une ampoule s'allume, soit le modèle de l'unipôle. Les experts ($N = 11$) étaient des étudiants au baccalauréat en physique ayant suivi plusieurs cours de sciences aux niveaux collégial et universitaire et adhérant au modèle scientifique du circuit électrique. La tâche administrée aux deux groupes consistait à évaluer l'exactitude de stimuli représentant des circuits électriques tantôt scientifiques, tantôt non scientifiques correspondant au modèle de l'unipôle. Le résultat le plus notable de cette étude est à l'effet que l'activité cérébrale des experts, comparativement à celle des novices, démontrait un recrutement du CCA (BA 32), du CPDL droit (BA 9) et du CPVL gauche (BA 45) lors de l'évaluation des circuits non scientifiques. Les auteurs ont donc conclu que, afin de répondre que les circuits non scientifiques étaient incorrects et éviter ainsi de commettre une erreur naïve, les experts avaient dû mobiliser leur mécanisme cérébral de contrôle inhibiteur. De plus, dans le même contraste, les auteurs ont observé une activation plus grande du gyrus angulaire droit (BA 39), qu'ils ont attribuée à la récupération en mémoire du modèle scientifiquement correct de circuit électrique (Blanke *et al.*, 2005; Mitchell, 2007; Saxe, Whitfield-Gabrieli, Scholz et Pelphey, 2009). Plus précisément, les auteurs ont attribué cette dernière activation à une combinaison effective du (1) traitement de l'information visuospatiale qui était présentée aux experts, à savoir les circuits électriques présentés à l'écran, et du (2) traitement d'informations ou représentations internes que les experts possédaient et qui étaient encodées dans leurs lobes pariétal et temporal, à savoir leur savoir scientifique préalable concernant les circuits électriques. Par conséquent, Masson *et al.* ont tiré des conclusions similaires à celles de Dunbar *et al.* (2007), à savoir que la conception alternative en électricité était toujours présente dans les réseaux

neuronaux des experts et que, pour répondre correctement, ils devaient inhiber cette conception, en plus de devoir mobiliser un mécanisme de récupération en mémoire pour récupérer le concept scientifique dans leurs réseaux neuronaux.

Enfin, utilisant encore l'IRMf, Brault Foisy *et al.* (2015) ont comparé l'activité cérébrale d'un groupe de novices ($N=19$) à celle d'un groupe d'experts ($N=10$) pendant l'exécution d'une tâche en mécanique similaire à celle utilisée dans l'étude de Dunbar *et al.* (2007). La tâche consistait en effet à évaluer l'exactitude de courts films dépeignant tantôt la chute de deux balles de grosseurs différentes à la même vitesse (c.-à-d. : film scientifique), tantôt une chute plus rapide de la balle plus grosse par rapport à la balle plus petite (c.-à-d. : film non scientifique correspondant à la conception alternative selon laquelle « un objet plus lourd chute plus vite qu'un objet plus léger »). Comme dans Masson *et al.* (2014), les novices étaient des étudiants universitaires en sciences humaines n'ayant pas suivi de cours de sciences optionnel au secondaire, alors que les experts étaient des étudiants au baccalauréat en physique ayant suivi plusieurs cours de sciences aux niveaux collégial et universitaire. Le résultat le plus notable de cette étude est à l'effet que l'activité cérébrale des experts, comparativement à celle des novices, démontrait un recrutement du CPDL gauche (BA 10/46) et du CPVL droit (BA 47) lors de l'évaluation des films non scientifiques, mais pas de recrutement du CCA. Par conséquent, similairement à Dunbar *et al.* (2007) et à Masson *et al.* (2014), Brault Foisy *et al.* ont conclu que (1) ce patron d'activation cérébrale observé chez les experts signifiait qu'ils avaient mobilisé leur mécanisme de contrôle inhibiteur afin de répondre correctement et de ne pas commettre une erreur naïve, et que (2) ce besoin d'inhibition était dû au fait que la conception alternative coexistait toujours dans leurs réseaux neuronaux avec le concept scientifique. Quant au non-recrutement du CCA par les experts, en comparaison aux novices, il s'agit d'un résultat allant à l'encontre de ceux de Dunbar *et al.* (2007) et de ceux de Masson *et al.* (2014). Pour expliquer ce résultat, Brault Foisy *et al.* ont notamment soulevé l'hypothèse qu'autant les experts et les novices

ont possiblement activé leur CCA lors de l'évaluation des films non scientifiques et qu'une différence d'activation significative n'a par conséquent pas pu être observée entre les deux groupes dans cette région cérébrale. Les novices auraient ainsi possiblement pu vivre un état de conflit cognitif ou d'incertitude en vérifiant l'exactitude des films non scientifiques, ce qui a pu mener à une activation inattendue du CCA.

2.3.3.3 Synthèse et limites des études neuroscientifiques sur le changement conceptuel en sciences

Les études neuroscientifiques précédemment discutées ont permis de produire des connaissances nouvelles quant au processus de changement conceptuel en sciences. Pour ce faire, elles ont étudié celui-ci à un niveau d'analyse auparavant inexploré, soit le niveau cérébral (Dunbar *et al.*, 2007; Geake, 2003; Geake et Cooper, 2003) et ont exploré une variable dépendante nouvelle, soit l'activité cérébrale des apprenants (Henson, 2005). Ainsi, ces études ont notamment permis de contre-vérifier les résultats des études psycho-cognitivistes et de confirmer la théorie de la coexistence des conceptions alternatives et des concepts scientifiques dans les structures cognitives des apprenants, même lorsque ceux-ci possèdent un niveau avancé d'expertise scientifique. Dans la même veine, ces études ont permis de confirmer le rôle important du mécanisme de contrôle inhibiteur dans le changement conceptuel en mécanique et en électricité, en observant l'activation de régions cérébrales sous-tendant ce mécanisme lorsque des participants experts devaient évaluer des stimuli sous-tendant une conception alternative. Toutefois, ces études présentent certaines limites communes, parmi lesquelles trois semblent particulièrement importantes à soulever.

La première limite consiste dans le fait que les groupes d'experts utilisés dans ces études ne comprenaient que des étudiants dans des baccalauréats scientifiques. Bien

qu'ayant suivi plusieurs cours de sciences de niveaux collégial et universitaire, il n'en demeure pas moins qu'il ne s'agissait que d'étudiants. Ainsi, il est bien probable que leur patron d'activité cérébrale, marqué par l'activation de régions inhibitrices lors de l'évaluation de stimuli correspondant à des conceptions alternatives, ne représente pas nécessairement un processus de changement conceptuel qui soit complété. Une piste de recherche intéressante serait par conséquent d'examiner l'activité cérébrale de participants ayant un niveau d'expertise plus élevé encore, par exemple des détenteurs d'un doctorat en sciences, alors qu'ils exécutent les mêmes tâches afin d'observer si l'activation de régions cérébrales inhibitrices est toujours présente.

La deuxième limite consiste dans le fait que ces études n'ont pas abordé la question des interventions pédagogiques. Cette question consisterait, principalement, à examiner l'effet d'un ou de plusieurs types d'enseignement sur le patron d'activité cérébrale des novices afin d'observer quel type d'enseignement permet de rapprocher davantage ce patron de celui des experts ayant déjà complété le processus de changement conceptuel. Un type d'enseignement possible serait l'entraînement au contrôle inhibiteur, déjà abordé précédemment, qui s'est déjà révélé efficace dans le domaine du raisonnement logique (Houdé *et al.*, 2000, 2001). Ces études ayant conclu à des effets bénéfiques significatifs autant aux niveaux comportemental (c.-à-d. : réussite dans la tâche) que cérébral (c.-à-d. : activation de régions préfrontales inhibitrices), l'efficacité de ce type d'enseignement pourrait en effet être testée dans l'apprentissage des sciences.

La troisième limite est à l'effet que ces études préalables n'ont essentiellement que comparé le patron d'activité cérébrale d'experts en sciences, présumés avoir déjà complété le processus de changement conceptuel, à celui de novices, adhérant toujours à des conceptions alternatives. Ainsi, ces études n'ont pas examiné le changement progressif du patron de l'activité cérébrale associé au processus de changement conceptuel, processus longitudinal qui est le cheminement graduel par

lequel les novices progressent d'une adhésion à une conception alternative vers l'acquisition du concept scientifique normatif. Cette limite, tel que déjà décrit précédemment, est en lien avec l'un des débats majeurs ayant présentement cours dans la littérature, soit la séquence longitudinale optimale à travers laquelle un apprenant des sciences doit passer pour effectivement compléter un changement conceptuel.

La présente étude vise à combler, dans une modeste mesure, le manque de connaissances associé précisément à la troisième limite soulevée ci-dessus. Cette étude utilisera des participants novices en sciences et examinera les effets comportementaux et cérébraux provoqués par le fait de surmonter leur tendance à répondre en conformité avec une conception alternative fréquente à laquelle ils adhèrent. Pour ce faire, le taux d'exactitude dans les réponses, le temps de réaction et l'activité cérébrale des novices seront mesurés avant (prétest) et après (posttest) qu'ils aient surmonté cette tendance. Afin de permettre aux novices d'effectivement surmonter cette tendance, et donc de corriger leurs erreurs naïves au posttest par rapport au prétest, les réponses scientifiquement correctes au prétest leur seront fournies avant la passation du posttest. Ainsi, la présente étude peut être considérée comme étant longitudinale, car elle est de nature prospective et collectera des données sur un même groupe de participants à deux moments différents dans le temps (Caruana, Roman, Hernández-Sánchez et Solli, 2015). Ce faisant, cette étude tentera donc de produire de nouvelles connaissances en rapport avec le processus longitudinal de changement conceptuel en examinant le pôle opposé de l'expertise, soit le cas de novices n'ayant pas encore entamé un processus de changement conceptuel pour un concept donné. La présente étude propose donc un premier pas vers l'étude longitudinale du processus de changement conceptuel en sciences en vérifiant si le simple fait de corriger ses erreurs naïves par des réponses scientifiquement correctes peut mener à l'activation du mécanisme de contrôle inhibiteur, fortement associé par les études préalables au processus de changement

conceptuel. Également, les résultats obtenus dans cette étude pourront être mis en relation avec les différents postulats des modèles de changement conceptuel concernant la séquence longitudinale optimale à travers laquelle un apprenant des sciences doit passer pour effectivement compléter un changement conceptuel.

2.4 Hypothèses de recherche

Considérant les résultats des études psycho-cognitivistes et neuroscientifiques discutés ci-dessus, il est attendu que, afin de surmonter leur tendance erronée à répondre en conformité avec une conception alternative, des participants novices en sciences mobiliseront le mécanisme cérébral de contrôle inhibiteur. Au niveau comportemental, cette mobilisation devrait donc se manifester par un temps de réaction significativement plus long lorsque les participants répondront à des questions impliquant leur conception alternative au posttest, comparativement au prétest. Au niveau cérébral, cette mobilisation devrait se manifester par une activation plus grande des régions sous-tendant le contrôle inhibiteur (CCA, CPDL et CPVL) au posttest, comparativement au prétest. Si cette hypothèse s'avérait vraie, cela suggérerait que le mécanisme de contrôle inhibiteur jouerait un rôle important non seulement au stade d'un changement conceptuel complété (c.-à-d. : experts), mais également aux stades initiaux, voire préliminaires, du changement conceptuel (c.-à-d. : novices). En outre, vu l'activation du gyrus angulaire (BA 39) observée dans l'étude de Masson *et al.* (2014), une région associée à une récupération en mémoire du concept scientifique par les experts, il est également attendu que les novices dans la présente étude mobiliseront ce même mécanisme de récupération en mémoire au posttest, comparativement au prétest. Par conséquent, les hypothèses de recherche non nulles se lisent comme suit :

H₁ : Après que des participants novices en sciences auront surmonté leur tendance à répondre en conformité avec une conception alternative, comparativement à avant, un temps de réaction moyen significativement plus long sera observé dans leurs réponses à des questions impliquant cette conception.

H₂ : Après que des participants novices en sciences auront surmonté leur tendance à répondre en conformité avec une conception alternative, comparativement à avant, leur patron d'activité cérébrale démontrera une magnitude d'activation plus grande dans les régions sous-tendant le contrôle inhibiteur, soit le CCA (BA 24/32), le CPDL (BA 9/46) et le CPVL (BA 45/47).

H₃ : Après que des participants novices en sciences auront surmonté leur tendance à répondre en conformité avec une conception alternative, comparativement à avant, leur patron d'activité cérébrale démontrera une magnitude d'activation plus grande dans la région cérébrale sous-tendant la récupération en mémoire, soit le gyrus angulaire/lobule pariétal inférieur (BA 39).

En revanche, les hypothèses de recherche nulles se lisent comme suit :

H₀₁ : Après que des participants novices en sciences auront surmonté leur tendance à répondre en conformité avec une conception alternative, comparativement à avant, un temps de réaction moyen significativement plus long *ne sera pas* observé dans leurs réponses à des questions impliquant cette conception.

H₀₂ : Après que des participants novices en sciences auront surmonté leur tendance à répondre en conformité avec une conception alternative, comparativement à avant, leur patron d'activité cérébrale *ne démontrera pas* une magnitude d'activation plus grande dans les régions sous-tendant le contrôle inhibiteur, soit le CCA (BA 24/32), le CPDL (BA 9/46) et le CPVL (BA 45/47).

H₀₃ : Après que des participants novices en sciences auront surmonté leur tendance à répondre en conformité avec une conception alternative, comparativement à avant, leur patron d'activité cérébrale *ne* démontrera *pas* une magnitude d'activation plus grande dans la région cérébrale sous-tendant la récupération en mémoire, soit le gyrus angulaire/lobule pariétal inférieur (BA 39).

Pour vérifier ces hypothèses de recherche, la conception alternative choisie sera « un seul fil reliant une ampoule à une batterie suffit pour que l'ampoule s'allume ». Le choix de cette conception se justifie autant sur le plan de la pertinence scientifique que de la pertinence sociale. D'abord, cette conception a fait l'objet de l'étude récente de Masson *et al.* (2014). Par conséquent, la présente étude pourra obtenir des résultats qui seront dans la continuité immédiate de l'étude de Masson *et al.* Cela facilitera ainsi la mise en comparaison des résultats et l'inférence de nouvelles connaissances scientifiques sur le changement conceptuel d'un point de vue neuroscientifique. Également, tel que déjà discuté, cette conception correspond au modèle alternatif de l'unipôle ou du circuit électrique sans boucle fermée et elle est particulièrement fréquente chez les jeunes apprenants des sciences (Cepni et Keles, 2006; Engelhardt et Beichner, 2004; Wandersee *et al.*, 1994), en plus de persister jusqu'au niveau universitaire (Periago et Bohigas, 2005).

CHAPITRE III

MÉTHODOLOGIE

Ce troisième chapitre a comme but principal de présenter la méthodologie suivie dans la présente étude afin d'en assurer la reproductibilité. La première section décrira les participants et les critères de sélection qui ont été utilisés pour les inclure ou non dans l'étude. La deuxième section traitera brièvement du mode de recrutement utilisé. La troisième section présentera les types de données collectées, en se concentrant particulièrement sur les données de neuroimagerie et le choix de la technique de neuroimagerie privilégiée dans la présente étude, soit l'IRMf. La quatrième section décrira en détail la tâche utilisée ainsi que les stimuli. La cinquième section traitera de la procédure suivie pour collecter les données auprès des participants. La sixième section présentera les paramètres d'acquisition des images fonctionnelles et structurales. La septième section expliquera comment les données comportementales et cérébrales ont été analysées. Enfin, la huitième section traitera des considérations éthiques.

3.1 Participants et critères de sélection

L'approche neuroscientifique impose certaines contraintes sur les critères de sélection des participants. D'abord, les techniques d'analyse de données utilisées dans l'approche neuroscientifique exigent, afin d'assurer une puissance statistique

suffisante à l'étude, un nombre minimum de participants par groupe. Ce nombre minimum correspond à $N = 20$ participants, un nombre qui s'appuie sur les recommandations de statisticiens spécialisés en imagerie par résonance magnétique (Desmond et Glover, 2002; Murphy et Garavan, 2004). Plus précisément, ce nombre consiste en un « compromis » qui permet d'assurer une puissance statistique suffisante à l'étude, tout en minimisant les coûts engendrés par la collecte de données. Dans la même lignée, une autre contrainte touche la variabilité cérébrale des participants. En effet, il ne doit pas y avoir une trop grande variabilité cérébrale entre les participants d'un groupe. Cette variabilité peut notamment être causée par des facteurs comme le sexe, l'âge, la latéralité de la main, le niveau d'éducation ou la force académique (Cahill, 2006; Grabner, 2007; Grabner *et al.*, 2004; Neubauer, Fink et Schrausser, 2002). Pour tenir compte de ces contraintes, les participants inclus dans l'échantillon final de la présente étude représentent par conséquent un groupe relativement homogène. Leurs caractéristiques sont présentées au tableau 3.1. Ainsi, ils sont tous des hommes droitiers ($N = 22$), âgés entre 19 et 30 ans (âge moyen = $23,3 \pm 3,4$ ans) et étudiants au baccalauréat. En outre, la variance des cotes de rendement universitaire (CRU) des participants est faible ($CRU = 3,22 \pm 0,46$). Pour obtenir cette homogénéité, les femmes, les gauchers et les étudiants ayant une CRU atypique (c.-à-d. : $CRU > 4,1$ ou $CRU < 2,3$) ont donc été exclus durant la sélection et n'ont pas fait partie de l'échantillon final.

Par ailleurs, l'objectif de l'actuelle étude est de déterminer ce qu'il advient lorsque des novices en sciences surmontent leur tendance erronée à répondre en conformité avec une conception alternative. Conséquemment, les participants sélectionnés devaient impérativement être des novices en sciences adhérant à la conception alternative souhaitée, soit qu'un seul fil reliant une ampoule à une batterie suffit pour que l'ampoule s'allume. En l'occurrence, cela a été assuré dans un premier temps par le recrutement de participants volontaires uniquement dans des baccalauréats en sciences humaines (histoire, politique, communication, psychologie, philosophie,

droit ou kinanthropologie) dans deux universités francophones. Dans un deuxième temps, aucun des volontaires intéressés ne devait avoir suivi de cours de sciences aux niveaux collégial et universitaire, ni de cours de sciences optionnels au secondaire. Ainsi, le dernier cours de sciences suivi par les participants retenus remontait à il y a plusieurs années. Enfin, dans un troisième temps, l'adhésion des participants à la conception alternative souhaitée était assurée au moyen de l'administration d'un questionnaire (voir Annexe A, questions 2 et 7; tiré de Masson, 2012). Ainsi, les réponses fournies par les participants retenus devaient démontrer qu' (1) ils croyaient à la conception alternative selon laquelle un seul fil reliant l'ampoule à la batterie suffit pour que l'ampoule s'allume (question 7) et qu'(2) ils croyaient que l'ampoule ne s'allume pas si le fil connectant l'ampoule à la pile est brisé (question 2). La nécessité de cette deuxième croyance sera explicitée un peu plus loin. Ces critères de sélection et étapes ont donc permis de retenir un groupe homogène de participants sur le plan de plusieurs variables potentiellement confondantes, en plus de s'assurer que tous les participants de l'échantillon final adhéraient à la conception alternative souhaitée. Il sera maintenant question du recrutement des participants.

3.2 Recrutement des participants et consentement

Le recrutement des participants s'est déroulé à l'Université du Québec à Montréal et à l'Université de Montréal. Les étudiants ont été sollicités pendant un de leurs cours par un recruteur et ont été informés du but de la recherche, de ce que leur participation dans le présent projet de recherche impliquait, de leur droit de ne pas participer et des étapes à suivre s'ils souhaitaient effectivement participer. Les étudiants intéressés ont laissé leurs coordonnées au recruteur pour passer un questionnaire portant sur des questions liées aux sciences (Annexe A), compléter le formulaire de consentement (Annexe B) et s'assurer que l'IRMf ne présente pas de contre-indications pour eux (voir deux dernières pages de l'Annexe B). Après la collecte de données, chaque

participant a reçu une image en IRMf de son cerveau pour le remercier de son implication dans l'étude.

Tableau 3.1

Caractéristiques de l'échantillon final

Taille de l'échantillon	22
Âge moyen (\pm SD)	23,3 \pm 3,4 ans
Latéralité de la main	Droitier
Genre	Homme
Niveau d'éducation	Baccalauréat en sciences humaines
Formation scientifique	Aucun cours optionnel de sciences au secondaire
Réponses incorrectes	> 90 % au questionnaire « préscan »
Cote R moyenne (\pm SD)	26,67 \pm 2,94
CRU moyenne (\pm SD)	3,22 \pm 0,46

3.3 Types de données et instrument de mesure

Les données collectées dans le cadre de la présente étude ont été (1) des données comportementales, soit le taux d'exactitude dans les réponses des participants ainsi que leur temps de réaction alors qu'ils répondaient à des stimuli et (2) des images de l'activité cérébrale des participants lorsqu'ils répondaient à ces stimuli. Bien qu'il existe plusieurs techniques d'imagerie cérébrale, celle utilisée dans le cadre de la présente étude a été l'IRMf. Elle a été choisie, car il s'agit d'une technique d'imagerie qui comporte plusieurs avantages en rapport avec d'autres techniques d'imagerie cérébrale.

En effet, il existe une multitude de techniques d'imagerie cérébrale permettant de mesurer l'activité cérébrale des participants. Sans être parfaites, chacune de ces techniques comporte ses propres avantages et limites. Par exemple, la tomographie par émission de positrons (TEP) permet de mesurer la variation locale de débit sanguin (Reivich *et al.*, 1979) et peut représenter une avenue intéressante afin d'atteindre des objectifs de recherche associés à la réponse physiologique du cerveau lorsqu'il accomplit une tâche cognitive. Cette technique requiert l'injection dans le sang des participants de traceurs radioactifs, comme le fluor 18 ou l'oxygène 15 attachés à une molécule de glucose. Ces traceurs se distribuent par le sang et s'accumulent davantage dans les régions cérébrales plus activées qui bénéficient d'un apport de sang plus important. Des détecteurs enregistrent ensuite le modèle de distribution de la radioactivité émise par le traceur et permettent ainsi de localiser la région cérébrale qui est plus activée. Toutefois, la TEP n'est pas un choix de technique optimal, car, en plus d'être irradiante et invasive, la TEP n'offre pas une résolution spatiale élevée. La résolution offerte est en effet de l'ordre de $\geq 5-10$ mm (Glover, 2011).

Un autre choix de technique de neuroimagerie possible serait l'électroencéphalographie ou EEG (Berger, 1929). L'EEG mesure l'activité électrique du cerveau au moyen d'un casque comprenant un certain nombre d'électrodes placées sur le cuir chevelu. Cela est possible grâce au fait que les principales cellules du cerveau, les neurones, communiquent entre elles au moyen d'influx nerveux que ces électrodes détectent. L'EEG possède une excellente résolution temporelle, de l'ordre d'environ 1 ms, et peut donc mesurer en temps réel l'activité électrique du cerveau (Burle *et al.*, 2015). Cette technique a de plus connu des avancées importantes récemment. Ces avancées consistent notamment en (1) des algorithmes nouveaux et fiables de localisation de la source du signal électrique (p. ex. : Iacoviello, Petracca, Spezialetti et Placidi, 2015) et en (2) des casques haute densité ou EEG à « densité super-Nyquist » (Robinson *et al.*, 2017). Malgré ces avancées, l'inconvénient

principal de l'EEG demeure le fait que cette technique n'offre pas une très bonne résolution spatiale et ne permet donc pas de localiser avec une grande précision la ou les régions cérébrales activées (Robinson *et al.*, 2017).

Un autre choix de technique de neuroimagerie est la magnétoencéphalographie ou MEG (Cohen, 1972), qui fonctionne en mesurant directement les champs magnétiques produits par l'activation des réseaux de neurones. Cela est possible grâce au fait que les influx nerveux émis par les neurones donnent lieu à un champ magnétique, qui est détecté par des senseurs ultrasensibles. Cette technique offre une excellente résolution spatiale, de l'ordre d'environ 5 mm, et temporelle, de l'ordre d'environ 1 ms (Pizzella *et al.*, 2014). En revanche, elle ne permet pas de mesurer les activations profondes du cerveau, notamment l'activité sous-corticale du CCA qui intéresse particulièrement la présente étude.

Une autre technique existante est l'imagerie optique, aussi appelée tomographie optique, imagerie spectroscopique ou « near infrared spectroscopy » (NIRS) (Maki *et al.*, 1995; Tafer *et al.*, 2011). Cette technique utilise des lampes placées sur le scalp qui envoient des rayons lumineux incidents infrarouges vers le cerveau, pour ensuite collecter les rayons réfléchis au moyen de capteurs optiques placés sur le cuir chevelu. Considérant qu'une région du cerveau plus activée reçoit davantage d'hémoglobine oxygénée (HbO₂) et que ce type d'hémoglobine cause une modification des propriétés locales d'absorption de la lumière, il en résulte qu'une modification du patron de lumière réfléchi peut alors être détectée par les capteurs optiques (Lan, 2013). Cette technique, relativement nouvelle, est silencieuse et peu sensible aux mouvements de la tête et du tronc, en plus d'être non invasive. À la manière de l'EEG, cette technique a de plus connu des avancées récentes consistant en des méthodes algorithmiques permettant une localisation plus précise du signal (Davies *et al.*, 2015), comme les méthodes NIRFAST (Dehghani *et al.*, 2008) ou NIRO Hamamatsu (Weerakkody *et al.*, 2012). Malgré ces avancées, l'inconvénient

principal de l'imagerie optique demeure le fait que cette technique n'offre pas une très bonne résolution spatiale pour la localisation des activations dans les régions cérébrales profondes (Davies *et al.*, 2015). Donc, elle ne permet pas de mesurer avec une précision satisfaisante l'activité sous-corticale du CCA qui intéresse particulièrement la présente étude.

Le choix de l'IRMf s'impose donc naturellement dans la présente étude. D'abord, il s'agit d'une technique d'imagerie non invasive, à savoir ne requérant pas l'injection de substances radioactives comme pour la TEP. En outre, l'IRMf présente une excellente résolution spatiale (3-4 mm), meilleure que l'EEG, et permet ainsi de localiser avec précision la ou les régions cérébrales activées. Dans la même veine, l'IRMf permet de mesurer avec précision l'activation des régions cérébrales profondes ou sous-corticales, ce que ne permettent pas la MEG ou l'imagerie optique. Enfin, l'IRMf est une technique connue et utilisée depuis le début des années 1990 (Kwong *et al.*, 1992; Ogawa *et al.*, 1992; Ogawa, Lee, Kay et Ogawa, 1990) qui ne comporte aucun danger connu pour la santé et pour laquelle les protocoles de collecte et d'interprétation des images sont bien établis. C'est en outre une technique d'imagerie abondamment utilisée en milieu clinique depuis plusieurs années (Orringer, Vago et Golby, 2012). Un appareil d'IRMf est composé d'un aimant supraconducteur puissant (de 1,5 à 3,0 Teslas [T], voire même davantage), de gradients magnétiques permettant la localisation spatiale ainsi que de générateurs d'ondes électromagnétiques qui agissent aussi comme des antennes captant le signal. Le principe de l'IRMf se base sur le fait que, lors de l'activation d'une région cérébrale, il est possible d'observer une augmentation localisée de la concentration d'hémoglobine oxygénée. Comme l'hémoglobine oxygénée et l'hémoglobine désoxygénée ne possèdent pas les mêmes propriétés magnétiques et paramagnétiques, une variation de signal est observée lorsque la concentration de ces deux types d'hémoglobine se modifie (Buckner, 1998; Poldrack, Mumford et Nichols, 2011). Enfin, l'appareil d'IRMf utilisé dans le cadre de la présente étude est le Siemens TRIO TIM de 3 T comprenant une antenne de 12

canaux (figure 3.1). Cet appareil est situé à l'Unité de neuroimagerie fonctionnelle (UNF) de l'Institut universitaire de gériatrie de Montréal (IUGM).

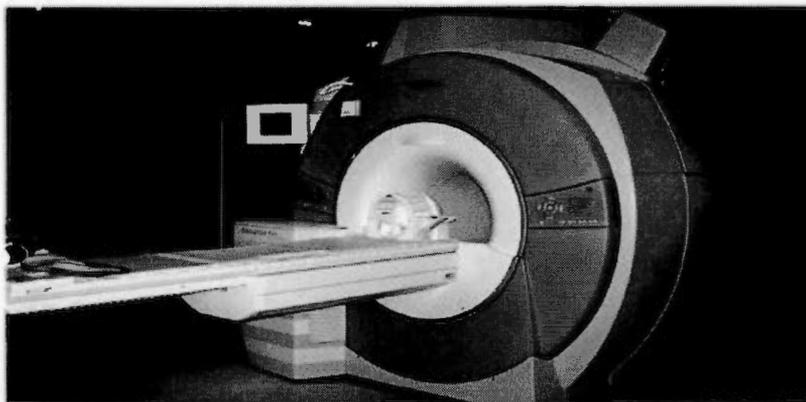


Figure 3.1. Appareil d'IRMf utilisé dans la présente étude.

3.4 Tâche et stimuli

La tâche a été créée en utilisant le logiciel reconnu E-Prime 2.0, conçu par la firme Psychology Software Tools. Durant l'exécution de la tâche, les participants étaient étendus dans l'appareil d'IRMf. Sur un écran d'ordinateur, que les participants voyaient via un miroir et un système de projection, trois types de stimuli étaient présentés : (1) des circuits électriques scientifiques dans lesquels un seul fil connectait l'ampoule à la batterie, mais où l'ampoule ne s'allumait pas; (2) des circuits électriques naïfs ou non scientifiques, dans lesquels un seul fil connectait l'ampoule à la batterie, mais où l'ampoule s'allumait, ce qui correspondait ainsi à la conception alternative visée par la présente étude; (3) des circuits électriques de contrôle dans lesquels le fil connectant l'ampoule à la batterie était brisé (figure 3.2). Pour éviter une confusion, il était clairement expliqué aux participants qu'une ligne sur l'écran correspondait à un seul fil électrique. En appuyant sur l'un parmi deux boutons, les participants devaient déterminer pour chacun des stimuli s'il représentait un circuit électrique correct ou incorrect (c.-à-d. : correct = index de la main droite;

incorrect = majeur de la main droite). Les réponses des participants ont été collectées avec une manette de type « 8-Button Bimanual Fiber Optic Response Pad », fabriquée par la compagnie Current Designs, Inc., basée à Philadelphie, PA, États-Unis. Les circuits de contrôle ont été utilisés afin de s'assurer que les participants avaient bien compris la tâche et, également, car ce type de circuit au fil brisé n'était sous-tendu par aucune conception alternative et n'impliquait donc aucun besoin de contrôle inhibiteur. Bien que tous les circuits présentés comprenaient deux ampoules, ils étaient néanmoins différents. Par exemple, la position des ampoules dans le circuit, l'endroit précis sur le circuit où le fil solitaire était connecté au reste du circuit ou bien la longueur de ce fil étaient des éléments qui changeaient d'un circuit à l'autre. Afin d'éviter un biais d'anticipation et d'habituation (Bandettini et Cox, 2000; Kao, 2014; Saleh, Kao et Pan, 2016; Wager et Nichols, 2003), un devis événementiel a été utilisé et les stimuli ont été présentés aux participants dans un ordre aléatoire. Chaque circuit a été présenté sans batterie pour une durée d'environ 1,5 seconde, après quoi une batterie était ajoutée au circuit et certaines ampoules s'allumaient, alors que d'autres non. Ces images avec des ampoules allumées et/ou éteintes demeuraient à l'écran pour une durée maximale de 2,5 secondes ou jusqu'à ce que les participants fournissent une réponse en appuyant sur un bouton.

Après avoir fourni leur réponse, les participants étaient soumis à une période de repos durant laquelle une croix de fixation (figure 3.2) leur était présentée à l'écran pour une durée soit de 2,5 secondes soit de 3,0 secondes. La variation de cette période de repos permettait de s'assurer qu'il n'y avait pas d'habituation ou d'anticipation du prochain stimulus (Cohen, Koppel, Malach et Friedman, 2014) et permettait également à la réponse hémodynamique associée à l'évaluation du stimulus précédent de redescendre. Quant aux stimuli, ils étaient divisés en deux séries équivalentes. Dans chaque série, il y avait 10 stimuli de chaque type (c.-à-d. : 10 circuits scientifiques, 10 circuits naïfs et 10 circuits de contrôle par série) (figure 3.3). En plus des courtes périodes de repos entre les stimuli, 20 périodes de fixation visuelle d'une

durée de 6,0 secondes ont été intercalées aléatoirement dans l'ensemble des séries, toujours dans l'optique d'éviter un biais d'habituation ou d'anticipation. Une pause d'environ 3 minutes a été accordée aux participants entre les deux séries. Enfin, les deux mêmes séries ont été présentées aux participants lors du prétest et du posttest.

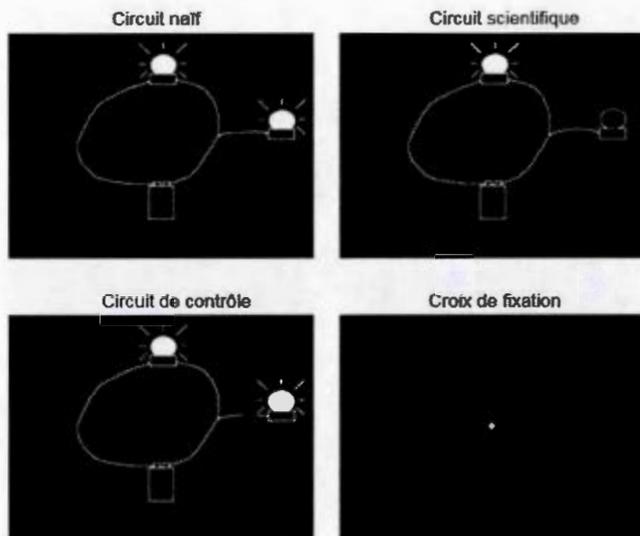


Figure 3.2. Types de stimuli utilisés dans la tâche. En haut à gauche : circuit naïf ou non scientifique, correspondant à la conception alternative du modèle de l'unipôle. En haut à droite : circuit scientifiquement correct. En bas à gauche : circuit de contrôle dans lequel l'ampoule s'allume malgré le fait que le fil soit brisé. En bas à droite : croix de fixation visuelle, correspondant à une période de repos pour les participants.

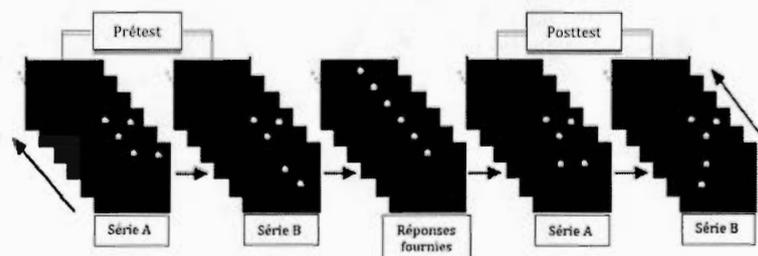


Figure 3.3. Séquence de stimuli utilisée dans la tâche. Au prétest, deux séries (A et B) comprenant chacune 10 stimuli scientifiques, naïfs et de contrôle ont été présentées aux participants. Au posttest, les deux mêmes séries ont été présentées aux

participants. Entre les deux séries, les bonnes réponses au prétest ont été présentées aux participants.

3.5 Procédure et paramètres d'acquisition des images

3.5.1 Présentation des consignes et tâche de pratique

Après leur arrivée à l'UNF, les participants ont été amenés à une chambre de simulation où ils ont d'abord visionné une courte vidéo, sur un écran d'ordinateur, leur présentant les consignes de la tâche. Les consignes reçues ont été les mêmes pour tous les participants et ont consisté en une description de la tâche, en comment répondre en utilisant la manette et en des exemples de stimuli qu'ils allaient rencontrer durant la vraie tâche. Après le visionnement de cette vidéo, les participants ont été soumis à une tâche de pratique sur un écran d'ordinateur, qui a consisté en 10 circuits électriques similaires à ceux de la vraie tâche. Puis, une seconde tâche de pratique a eu lieu dans un simulateur d'IRMf fourni par la compagnie Psychology Software Tools, Inc., basée à Sharpsburg, PA, États-Unis.

3.5.2 Acquisition des données cérébrales

À la suite des deux pratiques, les participants ont été emmenés à la salle abritant l'appareil d'IRMf pour la phase de collecte de données cérébrales. Dans la salle d'IRMf, les participants s'étendaient, en décubitus dorsal, sur la table de l'appareil. Puis, des bouchons étaient insérés dans leurs conduits auditifs externes afin de minimiser l'inconfort causé par le bruit émis par l'appareil d'IRMf lors de l'acquisition des images, bruit qui est de l'ordre de 80 à 90 dB. De plus, un casque d'écoute supra-auriculaire était placé sur les oreilles des participants. Ce casque, en plus de contribuer à atténuer encore davantage le bruit causé par l'appareil, permettait de communiquer avec le participant à partir de la salle de contrôle adjacente.

Également, afin de s'assurer que les participants soient confortables et ne souffrent d'engourdissements causés par une position en décubitus prolongée, des coussins étaient placés sous leurs genoux et leurs coudes. Une couverture recouvrait en outre le corps des participants afin d'éviter qu'ils n'aient froid et qu'ils ne commencent à trembler. En plus d'assurer leur confort, ces précautions servaient également à éviter, autant que possible, tout mouvement des participants dans l'appareil, le mouvement pouvant fausser les données collectées ou même les rendre inutilisables. Enfin, une fois la tête du participant bien positionnée, des coussins en mousse étaient insérés de chaque côté de sa tête, toujours dans une optique d'assurer le confort et de minimiser les mouvements. Une fois le participant installé, la séance d'IRMf commençait.

La séance d'IRMf à laquelle a été assujetti chaque participant a été la même et consistait en trois phases, soit l'acquisition d'images structurelles (T1), l'acquisition d'images fonctionnelles (T2) pendant l'exécution de la tâche au prétest et l'acquisition d'images fonctionnelles (T2) pendant l'exécution de la tâche au posttest. Le prétest et le posttest étaient identiques, d'une durée approximativement égale d'environ 20 minutes et ont consisté dans les trois phases suivantes :

1. La première phase a consisté en l'acquisition d'images structurelles (T1) des participants au moyen des paramètres énumérés dans la deuxième partie du tableau 3.2. En effet, les images structurelles sont nécessaires pour pouvoir procéder à la localisation des activations cérébrales ainsi que pour certaines étapes de l'analyse des données, étapes qui seront décrites à la section 3.6 du présent mémoire.

2. La deuxième phase consistait en une collecte de données (c.-à-d. : le prétest), qui a duré approximativement 20 minutes. Cette phase s'est déroulée en trois sous-étapes. La première sous-étape a consisté en la présentation des images de la première série (c.-à-d. : 10 circuits scientifiques, 10 circuits naïfs, 10 circuits de contrôle et 10 périodes de repos consistant en une croix de fixation visuelle). Durant cette série, des

images fonctionnelles (T2 « spin echo ») ont été acquises au moyen des paramètres énumérés dans le tableau 3.2.

3. La troisième phase a similairement consisté en la présentation des images de la deuxième série (10 circuits scientifiques, 10 circuits naïfs, 10 circuits de contrôle et 10 périodes de repos consistant en une croix de fixation visuelle). Comme lors de la première série, des images fonctionnelles (T2 « spin echo ») ont été acquises au moyen des paramètres énumérés au tableau 3.2.

Entre le prétest et le posttest a eu lieu une intervention d'une durée de quelques minutes, pendant laquelle les réponses correctes aux stimuli du prétest ont été présentées aux participants, et ce, afin de leur permettre de surmonter leur conception alternative lors du posttest subséquent. Cette intervention a été conçue au moyen du même logiciel déjà mentionné (E-Prime 2.0) et a consisté à montrer aux participants à deux reprises les réponses scientifiquement correctes à chacun des trois types de circuits électriques (c.-à-d. : circuits scientifiques, naïfs et de contrôle). La réponse correcte était chaque fois affichée à l'écran avec soit la mention « Correct » écrite en caractères verts pour les circuits scientifiques, soit la mention « Incorrect » écrite en caractères rouges pour les circuits naïfs et de contrôle (figure 3.4). Ces mentions apparaissaient à l'écran en dessous des circuits électriques.

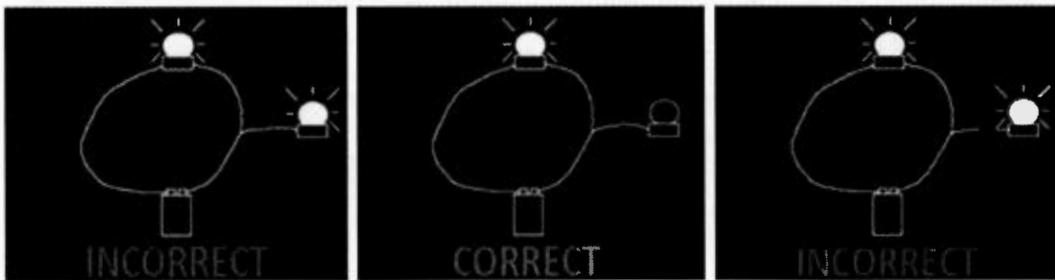


Figure 3.4. Stimuli utilisés pour l'intervention. Pour les stimuli naïfs (image de gauche) et de contrôle (image de droite), la mention « Incorrect » en caractères rouges était affichée en dessous des circuits. Pour les stimuli scientifiques (image du centre) la mention « Incorrect » en caractères rouges était affichée en dessous des circuits.

3.6 Analyse des données

3.6.1 Analyse des données comportementales

Les données comportementales de la présente étude sont le taux d'exactitude des réponses des participants et leur temps de réaction. Ces données ont été traitées au moyen du logiciel Statistical Package for Social Sciences (SPSS) 23, développé par la compagnie International Business Machines Corporation (IBM). Pour les trois types de stimuli (naïf, scientifique, contrôle), les statistiques descriptives ont consisté dans le calcul de moyennes (M) et d'écart-types (SD) au prétest et au posttest. Quant aux statistiques inférentielles, elles ont consisté dans le calcul de tests t à échantillons appariés afin de comparer les moyennes au posttest par rapport au prétest pour chacun des trois types de stimuli. Un seuil de significativité statistique classique de $p < ,05$ a été utilisé. Afin de s'assurer, au niveau du groupe, que les participants avaient effectivement surmonté leur conception alternative au posttest, comparativement au prétest, les participants devaient fournir (1) au-delà de 90 % de réponses en conformité avec la conception alternative du modèle de l'unipôle au prétest et (2) au-delà de 90 % de réponses en conformité avec le modèle scientifique de circuit

électrique au posttest. Concrètement, cela se traduit par (1) un taux d'exactitude combiné inférieur à 10 % pour les stimuli naïfs et scientifiques au prétest et (2) un taux d'exactitude combiné supérieur à 90 % pour les stimuli naïfs et scientifiques au posttest. Un seul participant n'a pas répondu en conformité avec ces critères, puisqu'il a obtenu un taux d'exactitude de 0 % au prétest (critère 1 respecté), mais un taux d'exactitude de 33,3 % au posttest (critère 2 non respecté). Les données de ce participant ont conséquemment été exclues de l'analyse et il n'a pas fait partie de l'échantillon final.

3.6.2 Prétraitement des données cérébrales

L'analyse des données de neuroimagerie collectées par IRMf nécessite diverses étapes de prétraitement des données (c.-à-d. : correction du mouvement ou réalignement des images, normalisation spatiale et lissage spatial), puis d'analyse des données (c.-à-d. : application du modèle linéaire général, test t) qui seront présentées dans cette section. L'ensemble des étapes de l'analyse a été réalisé au moyen du logiciel Statistical Parametric Mapping 8 (SPM8), développé par la compagnie Wellcome Trust Centre for Neuroimaging et fonctionnant avec MATLAB 7.4. La figure 3.5 présente de façon abrégée ces différentes étapes, alors que les sous-sections qui suivent décrivent ces étapes en détail.

3.6.2.1 Correction du mouvement ou réalignement

Afin de pouvoir être comparées les unes aux autres, les images collectées au moyen de l'IRMf doivent dans un premier temps subir une correction pour le mouvement (Brault Foisy, 2013; Goebel, 2014; Masson, 2012; Poldrack *et al.*, 2011). En effet, un déplacement de la tête d'un ordre aussi minime que 2 mm peut engendrer des problèmes lors des analyses. Par ailleurs, bien que la présente étude ait employé des

participants adultes spécifiquement instruits à ne pas bouger, certains mouvements physiologiques, comme la respiration et les battements cardiaques, causent de minimes mouvements inévitables de la tête. Pour procéder à la correction du mouvement, l'algorithme de SPM8 développé par Friston *et al.* (1996) a été utilisé dans le présent mémoire. Cet algorithme considère le cerveau comme étant un objet rigide et applique des transformations spatiales selon six paramètres, à savoir trois paramètres associés aux translations parallèles aux axes x, y et z dans un plan cartésien, ainsi que trois paramètres associés aux trois angles possibles de rotation de la tête. Le but de ces transformations est de réaligner les images d'une série par rapport à une image de référence. En réalisant une correction du mouvement, aussi appelée réalignement, il est donc possible de s'assurer qu'une région du cerveau est à la même position durant toute la période d'acquisition des données, ce qui est fondamental pour pouvoir procéder ensuite aux analyses.

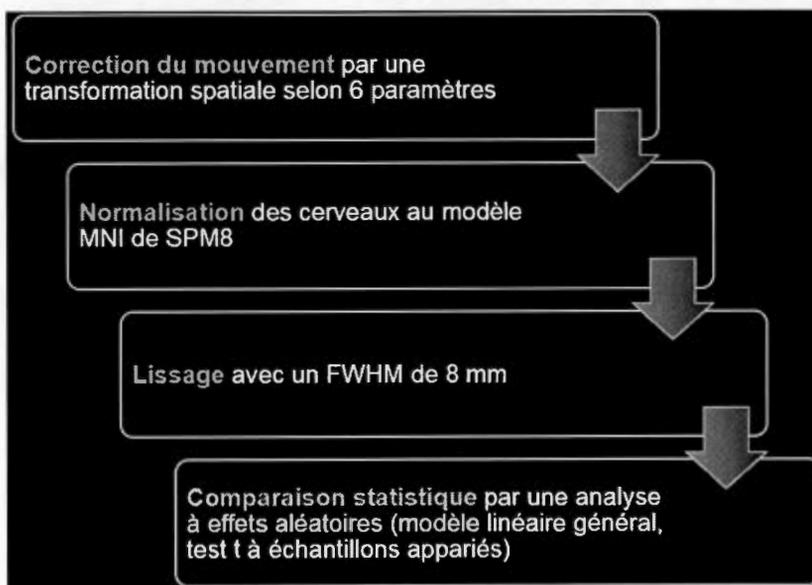


Figure 3.5. Étapes de prétraitement et d'analyse des données cérébrales. Le prétraitement a consisté en une correction du mouvement, une normalisation spatiale et un lissage spatial. L'analyse a consisté en une comparaison statistique basée sur le modèle linéaire général.

Tableau 3.2

Paramètres liés à l'acquisition des images

<p>Paramètres d'acquisition des images fonctionnelles (T2)</p>	<p>Appareil : Siemens TIM 3,0 T</p> <p>Temps de répétition = 2000 ms</p> <p>Temps d'écho = 30 ms</p> <p>« Flip angle » : 90 degrés</p> <p>Taille des voxels : 3 mm x 3 mm x 3 mm</p> <p>Ordre d'acquisition : « Ascending »</p> <p>Orientation des tranches : « AC-PC line » (« Anterior commissure - Posterior commissure »)</p> <p>Nombre de tranches : 33</p> <p>« Field of view » : 192</p> <p>Résolution dans le plan (matrice) : 64 x</p> <p>Antenne de tête : 12 canaux</p> <p>Épaisseur des tranches : 3,0 mm</p> <p>Espace entre les tranches : 25 % (0,8 mm)</p>
<p>Paramètres d'acquisition des images structurelles (T1)</p>	<p>Appareil : Siemens TIM 3,0 T</p> <p>Temps de répétition = 2300 ms</p> <p>Temps d'inversion = 900 ms («inversion</p> <p>Temps d'écho = 30 ms</p> <p>« Flip angle » : 9 degrés</p> <p>Taille voxels : 1,0 mm x 1,0 mm x 1,2</p> <p>Ordre d'acquisition : « interleaved »</p> <p>Orientation des tranches : sagittale</p> <p>Nombre de tranches : 160</p>

3.6.2.2 Normalisation spatiale

Afin de pouvoir moyenner les données de plusieurs participants et comparer leur activité cérébrale, il est essentiel de procéder à une normalisation des cerveaux des individus (Brault Foisy, 2013; Goebel, 2014; Masson, 2012; Poldrack *et al.*, 2011). En effet, puisque chaque cerveau présente une forme et une taille différentes et que la présente étude souhaite comparer l'activation de régions cérébrales précises, il devient nécessaire de modifier les images du cerveau de chacun des participants pour qu'elles montrent toutes des cerveaux de mêmes dimensions (c.-à-d. : longueur, largeur, etc.). Les logiciels accomplissant la procédure de normalisation fonctionnent en repérant les contours d'une image de référence et les contours des images du cerveau à transformer. Le cerveau de référence qui a été utilisé aux fins de la normalisation dans la présente étude est celui du Montreal Neurological Institute (MNI) présent dans SPM8. Après avoir identifié les contours des images du cerveau de chaque participant, ces logiciels les normalisent afin qu'elles soient similaires à l'image de référence. Ces logiciels déforment ainsi les images du cerveau de chaque participant afin qu'une localisation sur l'image du cerveau d'un participant corresponde exactement à la même localisation sur l'image du cerveau d'un autre participant. Plus précisément, pour la présente étude, la procédure de segmentation développée par Ashburner et Friston (2005) a été utilisée pour la normalisation.

3.6.2.3 Lissage spatial

Après les étapes de réalignement et de normalisation, il est nécessaire d'améliorer le rapport signal sur bruit en procédant à un lissage des données (Brault Foisy, 2013; Goebel, 2014; Masson, 2012; Poldrack *et al.*, 2011). Le lissage consiste à distribuer le signal de chacun des voxels du cerveau aux voxels avoisinants. Un voxel est une unité de forme et de volume arbitraires utilisée pour subdiviser le cerveau (Bartels et

Zeki, 2005). Elle est généralement de forme cubique et de petite taille, à savoir de quelques millimètres de côté. Le lissage permet une amélioration du rapport signal sur bruit en diminuant les pics d'activation ayant des intensités extrêmes et en renforçant la valeur des voxels fortement activés entourés de voxels qui sont eux aussi fortement activés. Pour procéder au lissage, le signal est réparti selon une fonction gaussienne de distribution normale et ayant une largeur précise à la moitié de la hauteur maximale de la courbe. Il est recommandé que ce paramètre, appelé « Full Width at Half Maximum (FWHM) », soit d'une valeur plus grande que celle d'un voxel, mais pas d'une valeur trop grande pour ne pas créer une trop grande perte de résolution spatiale des données (Goebel, 2014). Un ratio fréquemment recommandé dans la littérature est un FWHM entre deux à trois fois plus grand qu'un voxel (Lindquist, 2008; Poldrack *et al.*, 2011). En vertu de ces recommandations de la littérature et du fait qu'un FWHM de 8 mm est fréquemment utilisé par les études utilisant l'IRMf (Mikl *et al.*, 2008), un FWHM de 8 mm a conséquemment été choisi dans le cadre de la présente étude. Par ailleurs, en plus d'améliorer considérablement le rapport signal sur bruit, le lissage diminue les risques de considérer des artefacts comme des régions étant significativement activées. Deux exemples courants d'artefacts sont (1) l'artefact dû au mouvement du participant (Johnstone *et al.*, 2006) et (2) le « bruit physiologique », consistant en des activations artefactuelles se situant près des gros vaisseaux cérébraux et qui sont corrélées aux rythmes respiratoires et cardiaques des participants (Birn, Diamond, Smith et Bandettini, 2006; Birn, Murphy, Handwerker et Bandettini, 2009; Gawryluk, Mazerolle et D'Arcy, 2014). Enfin, un dernier avantage non négligeable du lissage est de faciliter la détection de régions qui sont activées chez plusieurs participants. En effet, étant donné que chaque cerveau est différent, le lissage permet d'éviter le cas où un voxel ne serait pas significativement activé parce que la région cérébrale d'intérêt ne se trouverait pas exactement dans les mêmes voxels d'une personne à l'autre.

3.6.3 Analyse des données cérébrales à l'aide du modèle linéaire général

3.6.3.1 Application du modèle linéaire général

Après que les images collectées par IRMf ont été réalignées, normalisées et lissées spatialement, il a été possible de vérifier si certaines régions étaient significativement plus activées au posttest, comparativement au prétest, à l'aide d'un test t à échantillons pairés (Brault Foisy, 2013; Goebel, 2014; Masson, 2012; Poldrack *et al.*, 2011). Plus précisément, les analyses statistiques ont reposé sur le modèle linéaire général selon lequel il est attendu que la variance de l'activité cérébrale ou réponse hémodynamique des participants (Y) peut être expliquée et modélisée à partir de (1) la combinaison linéaire de la variance de différents facteurs prédictifs (X_i) ayant différentes pondérations (β_i) au sein du modèle ainsi que d' (2) une certaine variance inexplicée par le modèle ou variance résiduelle (ε). Ce modèle s'écrit comme suit :

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \dots + \beta_n X_n + \varepsilon \quad (1)$$

Les facteurs inclus dans ce modèle dépendent du devis de l'expérience. Dans la présente étude, ces facteurs ont consisté notamment dans le type de stimulus présenté (c.-à-d. : scientifique, naïf, contrôle), dans la logistique de présentation des stimuli (p. ex. : moment de départ, durée des stimuli à l'écran), et dans le niveau d'activation de base du cerveau des participants (c.-à-d. : état du cerveau au repos, sans aucune tâche en cours). Les paramètres de la correction du mouvement, décrits à la section 3.6.2.1, ont également été inclus comme facteurs sans intérêt au sein du modèle. Le modèle linéaire général a été utilisé pour modéliser les données. Plus précisément, l'activité cérébrale associée à l'évaluation de chaque type de stimuli a été modélisée en effectuant une convolution entre le vecteur décrivant les moments où les stimuli sont

présentés et une fonction gaussienne représentant la réponse hémodynamique. Ensuite, par la méthode des moindres carrés, les valeurs des différentes pondérations (β) qui minimisent la variance résiduelle ε ont été obtenues. Sous forme matricielle comprenant les valeurs de tous les voxels à tous les temps, il est permis d'obtenir ce qui suit :

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

Pour vérifier quelles régions cérébrales ont été significativement plus activées au posttest comparativement au prétest, c'est-à-dire pour vérifier si la différence entre les pondérations β était significativement plus grande que zéro entre le posttest et le prétest, un test t à échantillons appariés a été utilisé selon la formule de Student (Goebel, 2014; Howell, 2008) :

$$t = \text{Moyenne } (\beta)_{\text{posttest}} - \text{Moyenne } (\beta)_{\text{prétest}} / \text{Écart-type } (\beta)_{\text{combiné prétest et posttest}} \quad (3)$$

Donc, ces tests t ont permis de déterminer si la différence entre l'activité cérébrale des participants au posttest, comparativement au prétest, était significativement plus grande que zéro lors de l'évaluation de chacun des trois types de stimuli d'intérêt (circuits naïfs, scientifiques, contrôle). Cette comparaison statistique est appelée « *subtractive contrast* », car elle consiste à soustraire l'activité cérébrale du prétest de celle observée au posttest pour chacun des stimuli (O'Conaill *et al.*, 2015). Dans le cas présent, il y a ainsi eu trois contrastes d'intérêt, soit un contraste pour chacun des trois types de stimuli. Quant à la période de repos consistant à fixer une croix de fixation, il a été tenu compte de l'activité cérébrale provoquée par ce type de stimulus en incluant celle-ci dans chacun des contrastes. Cela permet en effet de mieux contrôler pour les nombreuses activations spontanées survenant dans le cerveau humain lors de la simple fixation visuelle d'un stimulus (p. ex. : Marsman *et al.*,

2012; Marsman, Renken, Haak et Cornelissen, 2013). Ainsi, les trois contrastes d'intérêt ont été les suivants :

$$[\text{Activation stimuli naïfs}_{\text{posttest}} - \text{Activation croix de fixation}_{\text{posttest}}] - [\text{Activation stimuli naïfs}_{\text{prétest}} - \text{Activation croix de fixation}_{\text{prétest}}] \quad (1)$$

$$[\text{Activation stimuli scientifiques}_{\text{posttest}} - \text{Activation croix de fixation}_{\text{posttest}}] - [\text{Activation stimuli scientifiques}_{\text{prétest}} - \text{Activation croix de fixation}_{\text{prétest}}] \quad (2)$$

$$[\text{Activation stimuli contrôle}_{\text{posttest}} - \text{Activation croix de fixation}_{\text{posttest}}] - [\text{Activation stimuli contrôle}_{\text{prétest}} - \text{Activation croix de fixation}_{\text{prétest}}] \quad (3)$$

Enfin, puisque dans la présente étude l'objectif n'est pas de comparer l'activité cérébrale après vs avant d'un seul individu, mais plutôt celle d'un groupe, la moyenne des résultats de l'ensemble des participants de chacun des deux groupes a été calculée. Pour ce faire, dans un premier temps, une analyse à effet fixe (ou analyse intra-sujet) a été menée à l'aide de SPM8. Cette analyse a permis de combiner les images obtenues au cours des séries 1 et 2. De cette façon, une carte statistique a été obtenue pour chacun des participants et pour chacune des comparaisons statistiques souhaitées. Cette analyse a donc permis d'obtenir l'activité cérébrale de chacun des participants.

Toutefois, pour connaître l'activité cérébrale d'un groupe ou pour comparer l'activité cérébrale d'un groupe à deux temps différents, il ne convient pas de simplement réaliser une analyse de premier niveau. Ce type d'analyse, convenant aux analyses intra-sujets, ne permet effectivement pas de généraliser les résultats obtenus à l'ensemble d'une population statistique (Huettel, Song et McCarthy, 2004). Cela est causé par le fait que l'analyse de premier niveau est particulièrement sensible aux données extrêmes, et qu'il n'est conséquemment pas possible d'extrapoler les résultats

obtenus à l'ensemble de la population à l'étude. À titre d'exemple, dans la présente étude, si six des participants de l'échantillon total de 22 participants réagissaient fortement aux stimuli en activant significativement plusieurs régions cérébrales, une analyse de premier niveau conduirait à l'obtention de résultats statistiquement significatifs pour l'ensemble du groupe, et ce, même si les seize autres participants ne réagissaient que faiblement à la tâche en ne présentant que peu ou pas d'activations cérébrales significatives. Pour résoudre ce problème, des analyses à effets aléatoires utilisant des tests t pairés (après vs avant) ont donc été menées. Pour qu'une différence significative soit observée au moyen de ce test d'inférence statistique, l'effet observé doit être présent de façon importante chez tous les participants du groupe. En d'autres termes, les participants réagissant fortement aux stimuli ne peuvent compenser pour les participants qui ne réagissent que faiblement aux stimuli. Ce type d'analyse est par conséquent plus approprié pour généraliser les résultats obtenus à l'ensemble d'une population statistique donnée, soit, en l'occurrence, les novices en électricité.

3.6.3.2 Détermination du seuil de significativité statistique

La détermination du seuil de significativité statistique en IRMf pose problème en raison du nombre considérable de voxels impliqués dans l'analyse statistique. Si un seul voxel était impliqué dans la comparaison statistique (p. ex. : activation du voxel après vs avant), un seuil conventionnel de $p < ,05$ conviendrait pour les tests d'inférence statistique, comme le test t . Toutefois, un grand nombre de voxels sont impliqués dans l'analyse (c.-à-d. : $n \approx 100\,000$ voxels dans le cas présent). Réaliser une comparaison statistique séparée pour chacun de ces voxels poserait alors un problème majeur de comparaison statistique multiple. En effet, puisque l'utilisation d'un seuil traditionnel de $p < ,05$ prévoit un risque d'erreur de type alpha ou de type I de 5 %, la comparaison statistique séparée de 100 000 voxels mènerait à 5 000 voxels

faussement activés. Cela signifie que ces 5 000 voxels seraient étiquetés comme étant « significativement activés », alors que, dans les faits, leur activation atteindrait le seuil de signification statistique uniquement dû au hasard.

Plusieurs méthodes statistiques ont été suggérées, dans la littérature scientifique, afin de contrôler pour ce problème de comparaisons multiples (Nichols et Hayasaka, 2003). Une méthode possible consiste dans la correction pour comparaisons multiples de Bonferroni. Cette méthode est une correction simple qui permet de contrôler pour l'erreur alpha en calculant des seuils de significativité statistique corrigés au niveau d'un voxel individuel en fonction du nombre de comparaisons multiples effectuées, de telle sorte qu'un seuil statistique de $p < ,05$ est obtenu au niveau global pour l'ensemble des voxels. La correction de Bonferroni consiste à diviser le seuil p souhaité par le nombre de comparaisons statistiques effectuées :

$$p_{\text{Bonferroni}} = p_{\text{souhaité}} / n \quad (4)$$

Dans le cas de $n = 100\,000$ voxels et avec un seuil souhaité au niveau global de $p < ,05$, ce calcul donne donc : $p = 0,05 / 100\,000 = 0,000\,000\,5$. Ainsi, pour obtenir une probabilité d'erreur globale de 5 %, le seuil de significativité statistique au niveau d'un voxel individuel devrait être de $p = 0,000\,000\,5$. Or, ce seuil est trop strict et présente un risque statistique inacceptable d'erreur de type bêta ou d'erreur de type II, à savoir que certaines régions cérébrales ne paraissent pas être significativement activées, alors qu'en réalité elles le sont. De plus, la correction de Bonferroni est pertinente dans les cas où l'ensemble des comparaisons multiples seraient réellement indépendantes les unes des autres, ce qui n'est pas le cas avec des voxels cérébraux. En effet, les voxels adjacents sont fortement corrélés pour des raisons physiologiques, car des régions cérébrales adjacentes remplissent des fonctions similaires, mais également pour des raisons techniques associées à la saisie du signal d'IRMf. En

outre, puisqu'un lissage spatial est appliqué aux images d'IRMf collectées, les voxels adjacents deviennent forcément corrélés les uns aux autres.

Par conséquent, une solution fréquemment recommandée dans la littérature (Goebel, 2014) est d'utiliser un seuil corrigé $p_{\text{FWE-corr}}$ (correction nommée « family-wise error ») qui tient compte aussi bien des corrélations physiologiques liant entre eux les voxels adjacents que du degré de lissage spatial appliqué. Cette correction n'est donc pas aussi stricte que celle de Bonferroni, mais demeure tout de même considérablement plus stricte que l'utilisation d'un seuil classique non corrigé de $p < ,05$.

Une autre solution fréquemment recommandée dans la littérature scientifique consiste à utiliser un compromis entre le seuil statistique classique de $p < ,05$, présentant un risque inacceptable d'erreur de type alpha, et le seuil trop strict de $p = 0,000\ 000\ 5$. Ce compromis consiste à poser un seuil de significativité statistique de $p < ,001$ ou même plus petit (Carter, Lesh et Barch, 2016; Eklund, Nichols et Knutsson, 2016; Lieberman et Cunningham, 2009; Poldrack *et al.*, 2008; Roiser *et al.*, 2016; Woo, Krishnan et Wager, 2014). Puisque des recherches récentes menées par des statisticiens de l'IRMf associent un seuil de $p < ,001$ à un risque légèrement trop grand de commettre une erreur de type alpha (Eklund *et al.*, 2016; Roiser *et al.*, 2016), la présente étude a utilisé un seuil non corrigé de $p < ,0005$. Ce seuil est donc considérablement plus strict que le seuil classique de $p < ,05$, mais moins strict que le seuil $p_{\text{FWE-corr}}$. À moins d'avis contraire, tous les résultats au niveau cérébral rapportés dans la section suivante du présent mémoire seront ainsi significatifs à un seuil non corrigé de $p < ,0005$. Également, lorsque des activations demeureront significatives même au seuil corrigé $p_{\text{FWE-corr}}$, un seuil plus strict, cela sera explicitement indiqué.

Également, en plus d'un seuil de significativité p , l'analyse de données d'IRMf doit poser un autre seuil, soit le nombre minimal k de voxels contigus activés pour qu'une

activation observée dans le cerveau soit considérée comme étant statistiquement significative (Woo *et al.*, 2014). Il ne semble pas exister de consensus dans la littérature scientifique quant à la valeur minimale de ce nombre k , mais il est tout de même recommandé de tenir compte de certains facteurs. Ceux-ci sont notamment le nombre et la taille des voxels individuels considérés ainsi que les objectifs de l'étude (Roiser *et al.*, 2016). À titre d'exemple, considérer de tout petits voxels de 1 mm x 1 mm x 1 mm donne lieu à des voxels d'un volume 27 fois plus petit que considérer des voxels plus grands de 3 mm x 3 mm x 3 mm. Un seuil minimal k plus grand serait alors nécessaire dans le premier cas par rapport au second afin de ne pas considérer des activations artefactuelles comme étant significatives. Récemment, concernant ce seuil k , Carter *et al.* (2016, p. 100) résumaient le manque de lignes directrices précises en ces termes : « At the present time, there appears to be no single voxel height threshold that is optimal for all studies ». Dans la présente étude, compte tenu de (1) la taille de 3 mm x 3 mm x 3 mm ainsi que d' (2) un certain caractère exploratoire de l'étude, portant pour la première fois sur l'activité cérébrale de novices qui surmontent une conception alternative, un seuil arbitraire assez petit de $k > 5$ voxels a été utilisé. Par conséquent, sauf avis contraire, tous les résultats au niveau cérébral rapportés dans la section suivante du présent mémoire seront significatifs à un seuil de $k > 5$ voxels.

Enfin, un dernier critère notable à considérer dans la détermination de la significativité des comparaisons statistiques en IRMf sont les considérations topologiques (Hayasaka *et al.*, 2004; Hayasaka et Nichols, 2003, 2004; Roels, Bossier, Loeys et Moerkerke, 2015; Worsley *et al.*, 1996, 2002; Worsley, Taylor, Tomaiuolo et Lerch, 2004). Ces considérations consistent à choisir si une activation observée est jugée significative (1) au niveau du « peak » (un pic d'activation maximale dans un voxel précis du cerveau, appelé aussi « local maxima ») ou (2) au niveau du « cluster » (groupement de voxels contigus comprenant ce « local maxima » et les voxels avoisinants). Une activation jugée significative au niveau d'un

« peak » signifie qu'il est permis d'être certain statistiquement, avec moins de 5 % de risque de se tromper dû au hasard, qu'un voxel de coordonnées x,y,z est activé, mais qu'il n'est pas permis d'être certain statistiquement que les voxels contigus le sont également. Une analyse au niveau du peak est donc plus sensible pour détecter une activation de haute intensité, mais de faible étendue spatiale. Une activation jugée significative au niveau d'un « cluster » signifie qu'il est permis d'être certain, avec moins de 5 % de risque de se tromper dû au hasard, que l'ensemble des voxels k compris dans un groupement donné sont activés. Une analyse au niveau du « cluster » est donc plus sensible pour détecter une activation de moins haute intensité, mais plus étendue spatialement. Les risques précis d'erreur statistique de type I et de type II ont été calculés par des statisticiens de l'IRMf (Roels *et al.*, 2015, p. 43) pour chacun de ces deux types d'analyses. Ces risques dépendent notamment du type précis d'approche statistique utilisée (paramétrique vs non paramétrique), du seuil alpha non corrigé utilisé (p) et du degré de lissage appliqué aux images (valeur du FWHM). Étant donné que la présente étude a utilisé une approche paramétrique basée sur le modèle linéaire général, qu'un seuil alpha non corrigé modérément sévère de $p < ,0005$ a été utilisé et qu'un lissage de $\text{FWHM} = 8 \text{ mm}$ a été appliqué, le risque d'erreur statistique de type I associé à une analyse par « cluster » semble pouvoir être approximé à moins qu'une chance sur mille, tandis que le risque d'erreur statistique de type I associé à une analyse par « peak » semble pouvoir être approximé à moins que deux chances sur mille. Une analyse par « cluster », dans le cas présent, semble donc associée à un risque très légèrement plus faible de commettre une erreur de type I, tandis qu'une analyse par « peak » semble associée à une puissance statistique très légèrement plus grande.

Dans le cadre de la présente étude, la section des résultats ne fera que mentionner, à titre informatif, si un résultat est significatif au niveau du « cluster » ou au niveau du « peak ». Ceci se justifie notamment par le fait que les deux risques d'erreur de type I semblent, en l'occurrence, pratiquement identiques et entièrement acceptables

statistiquement, et que la puissance des deux types d'analyses semble elle aussi être pratiquement la même. En outre, compte tenu de l'objectif de la présente étude, une distinction plus fine de la significativité des résultats obtenus en vertu de la significativité au niveau du « cluster » versus celle au niveau du « peak » ne contribuerait qu'à alourdir le propos.

3.6.3.3 Analyse par régions d'intérêt (ROI)

Étant donné les hypothèses précises de la présente étude quant aux activations cérébrales attendues chez les novices après vs avant, une analyse par régions d'intérêt ou ROI (pour « region of interest ») a également été menée. En résumé, cette analyse consiste en deux temps : (1) définir une région cérébrale précise d'intérêt en se basant sur une hypothèse *a priori*, puis (2) vérifier si une activation statistiquement significative survient effectivement dans cette région. Une analyse par ROI présente certains avantages non négligeables par rapport à l'analyse tenant compte du cerveau en entier ou « whole-brain analysis » qui a été décrite dans les sections précédentes (Eickhoff *et al.*, 2005; Eickhoff, Heim, Zilles et Amunts, 2006; Poldrack, 2007; Saxe, Brett et Kanwisher, 2006). Les deux avantages applicables dans le cas de la présente étude sont (1) une amélioration supplémentaire du contrôle pour l'erreur de type alpha, puisqu'une analyse par ROI consiste à tester l'activation d'une région cérébrale précise et ne contient pas de comparaisons multiples et (2) la vérification d'une hypothèse associée à l'activation précise d'une région cérébrale, hypothèse qui repose sur de l'information préalable. Concernant ce deuxième avantage, Poldrack (2007, p. 67) le décrit comme un « separate 'localizer' scan or condition ». Il convient ici de rappeler que la présente étude a émis les hypothèses d'une activation des mécanismes cognitifs de (1) contrôle inhibiteur et de (2) récupération en mémoire. Par conséquent, une région cérébrale spécifique, sous-tendant le plus précisément possible chacun de ces deux mécanismes, doit dans un premier temps être définie.

La littérature scientifique prévoit au moins deux approches pour définir des ROI. La première est l'approche *structurelle* et consiste à définir des ROI en se basant sur la macroanatomie du cerveau, comme l'anatomie des gyri (c.-à-d. : les circonvolutions ou replis sinueux du cerveau) et des sulci (c.-à-d. : les sillons entre ces circonvolutions) (Eickhoff *et al.*, 2006; Etzel, Gazzola et Keysers, 2009; Poldrack, 2007). Les développements des deux dernières décennies concernant les connaissances de l'anatomie cérébrale permettent en effet un « étiquetage » précis des structures du cerveau humain sur des images d'IRMf (Fischl *et al.*, 2004). À ce sujet, plusieurs atlas de l'anatomie cérébrale humaine existent. Certains reposent sur des données de neuroimagerie collectées sur un sujet unique (« single subject anatomical atlases »), comme l'atlas Automated Anatomical Labeling ou AAL de Tzourio-Mazoyer *et al.* (2002) ou l'atlas de Talairach (Talairach et Tournoux, 1988). Des mises en garde existent toutefois dans la littérature (p. ex. : Nieto-Castanon, Ghosh, Tourville et Guenther, 2003; Poldrack, 2007) contre l'utilisation de ces atlas, et ce, à cause de l'incapacité possible de la procédure de normalisation spatiale à toujours « assortir » parfaitement les images des cerveaux d'un groupe de participants dans une étude donnée à l'image du cerveau modèle ou « brain template » fourni dans ces atlas. Cela est dû au fait qu'un atlas reposant sur un seul sujet pourrait être plus difficilement généralisable à une population statistique donnée. Il peut donc en résulter des correspondances imparfaites entre la localisation de régions cérébrales sur les images normalisées des cerveaux des participants d'une étude et les images modèles fournies dans ces atlas.

Conséquemment, la littérature recommande de privilégier plutôt l'utilisation d'atlas qui reposent sur la collecte de données de neuroimagerie issues de plusieurs sujets (« multiple subject anatomical atlases »). Les images modèles ou « brain templates » produites par ces atlas sont en effet plus généralisables à une population statistique donnée et la correspondance entre ces images et les images normalisées produites dans une étude donnée est conséquemment plus fiable. Plusieurs atlas multi-sujets

sont disponibles dans la littérature scientifique (p. ex. : Collins, Zijdenbos, Baaré et Evans, 1999; Hammers *et al.*, 2003; Klein *et al.*, 2005; Mega *et al.*, 2005; Van Essen *et al.*, 2006; Shattuck *et al.*, 2006). De plus, un atlas multi-sujets utilisant les aires de Brodmann (Eickhoff *et al.*, 2006) est aussi disponible dans le logiciel SPM8 comme partie intégrante du SPM Anatomy Toolbox. Toutefois, bien que dans une moindre mesure, l'utilisation d'atlas reposant sur plusieurs sujets est également sujette à la même critique que celle décrite pour les atlas reposant sur un seul sujet. Saxe *et al.* (2006, p. 1089) résumant cette critique en ces mots : « Well known brain areas [...] do not land consistently in the same place in any set of standard anatomical coordinates, across individuals ». En outre, l'utilisation de certains atlas, qu'ils reposent sur un ou sur plusieurs sujets, peut poser une difficulté technique considérable. En effet, pour définir une région anatomique d'intérêt, l'analyste doit généralement suivre un algorithme de délimitation très précis et se déclinant en de multiples étapes. Cet algorithme nécessite une connaissance précise de l'anatomie du cerveau humain, et même une petite erreur dans la délimitation pourrait avoir comme conséquence de définir incorrectement une région cérébrale et d'obtenir ainsi un résultat faussé (Saxe *et al.*, 2006).

Pour les raisons énumérées au paragraphe précédent, la présente étude a donc privilégié la deuxième approche décrite dans la littérature pour définir une ROI, soit l'approche *fonctionnelle* (Evans, Janke, Collins et Baillet, 2012; Poldrack, 2007; Saxe *et al.*, 2006). Bien que plusieurs techniques existent au sein de l'approche fonctionnelle, une technique couramment employée consiste à définir une ROI en se basant sur les résultats de la littérature antérieure. La forme la plus élémentaire de cette technique consiste à prendre les *coordonnées stéréotaxiques* d'une étude empirique préalable qui a utilisé une tâche en lien avec l'hypothèse de l'étude actuelle et à placer une ROI à ces coordonnées. Les coordonnées stéréotaxiques d'une activation cérébrale observée sont des coordonnées dans l'espace tridimensionnel du cerveau, selon les axes x, y et z. Plusieurs types d'espaces stéréotaxiques existent en

neuroimagerie (p. ex. : espace Talairach, espace Montreal Neurological Institute [MNI]). À titre d'exemple, dans le cas de l'hypothèse du contrôle inhibiteur de la présente étude, cette technique consisterait à prendre les coordonnées d'activation observées dans une étude préalable ayant utilisé une tâche mobilisant spécifiquement le mécanisme du contrôle inhibiteur, comme la tâche du Go/No-go. Toutefois, à cause de la grande variabilité intersujets existant d'une étude empirique à l'autre, de la variabilité entre les devis expérimentaux utilisés, entre les techniques d'analyse des données et même entre les appareils d'IRMf utilisés, une meilleure pratique consiste à dériver des ROI précises en se basant sur des méta-analyses plutôt que sur des études empiriques individuelles (Poldrack, 2007).

En conformité avec ces recommandations, la présente étude a donc défini des ROI sous la forme de coordonnées stéréotaxiques dans l'espace Talairach en se basant sur des méta-analyses préalables. D'abord, concernant l'hypothèse du contrôle inhibiteur (H₂), les coordonnées stéréotaxiques identifiant le plus précisément possible la région cérébrale associée au contrôle inhibiteur devaient être identifiées. Pour ce faire, une recherche a été effectuée dans les bases de données ERIC et Google Scholar, comprenant notamment les mots-clés *Go/No-go*, *meta-analysis* et *fMRI*. La tâche du Go/No-go a été favorisée aux dépens des tâches du Stroop et du Wisconsin, car, selon la littérature (Buchsbbaum *et al.*, 2005; Simmonds *et al.*, 2008), il s'agit de la tâche isolant le plus fidèlement le mécanisme du contrôle inhibiteur requis lorsqu'il faut inhiber une réponse ou stratégie tentante, mais inappropriée.

Cette recherche dans les bases de données a mené à un total de cinq méta-analyses jugées pertinentes (Buchsbbaum *et al.*, 2005; Criaud et Boulinguez, 2013; Levy et Wagner, 2011; Nee, Wager et Jonides, 2007; Simmonds *et al.*, 2008). Pour être jugée pertinente, une méta-analyse devait (1) avoir été publiée dans une revue arbitrée, (2) avoir examiné des études empiriques portant sur la tâche du Go/No-go et (3) fournir des coordonnées stéréotaxiques ou pics d'activation méta-analytiques

associés à cette tâche. Dans une méta-analyse, ces pics sont accompagnés d'un « Activation likelihood estimation » ou ALE (Turkeltaub *et al.*, 2002), qui correspond à l'évaluation de la probabilité qu'un pic donné soit effectivement activé à travers les études incluses dans la méta-analyse. Plus un pic est associé à une valeur ALE élevée, plus il est ainsi possible d'inférer que ce pic est fortement associé à la tâche en jeu. Pour les cinq méta-analyses portant sur le Go/No-go, le pic ayant la valeur ALE la plus élevée se trouvait toujours dans le cortex préfrontal ventrolatéral droit, région typiquement associée au contrôle inhibiteur *per se*, tel que décrit au chapitre 2. Tel qu'il ressort du tableau 3.3, les coordonnées de ces pics étaient similaires, mais non identiques d'une méta-analyse à l'autre. Par conséquent, une moyenne des cinq pics a été effectuée. Les coordonnées moyennes du pic défini comme étant la ROI en lien avec l'hypothèse du contrôle inhibiteur (H_2) dans la présente étude ont donc été les suivantes :

X = 42; Y = 27; Z = 27 (dans espace de Talairach)

Tableau 3.3

Coordonnées des pics d'activation les plus fortement associés au mécanisme de contrôle inhibiteur lors de l'exécution de la tâche du Go/No-go dans cinq méta-analyses

Auteurs	x	y	z
Buchsbaum, Greer, Chang et Berman (2005)	45	19	24
Simmonds, Pekar et Mostofsky (2008)	40	30	26
Criaud et Boulinguez, 2013	41	32	30
Levy et Wagner, 2011	40	32	30
Nee, Wager et Jonides, 2007	42	22	24

Une fois ces coordonnées établies, un *masque* appelé CPVL a été créé utilisant l'option SPM Masking Toolbox. Ce masque a consisté à créer une ROI consistant en une sphère placée dans le cortex préfrontal ventrolatéral droit ayant comme centre de gravité les coordonnées stéréotaxiques indiquées ci-dessus ($X = 42$; $Y = 27$; $Z = 27$) et possédant un rayon de 10 mm. Concernant la valeur de ce rayon, la littérature ne semble pas offrir de recommandations précises faisant consensus. En effet, certains statisticiens de l'IRMf se sont penchés sur le nombre optimal de voxels qu'une ROI devrait contenir, mais leurs résultats diffèrent. Par exemple, Cox et Savoy (2003) recommandent de définir des ROI comprenant environ 100 voxels, alors que Ku, Gretton, Macke et Logothetis (2008) recommandent de définir plutôt des ROI comprenant environ 400 voxels. Cependant, il y a tout de même consensus à l'effet qu'une sphère définissant une ROI ne doit pas contenir un nombre ni trop petit ni trop grand de voxels (Etzel *et al.*, 2009). Une sphère trop petite pose en effet un risque accru de manque de puissance statistique ou erreur de type II lorsque l'analyse est effectuée, alors qu'une sphère trop grande pose un risque accru d'erreur de type I. En outre, Etzel *et al.* (2009) soulignent qu'une sphère trop grande, contenant un nombre trop imposant de voxels, pose un risque de dépasser la limite de la mémoire de l'ordinateur utilisé pour traiter les données. Par conséquent, en vertu de ces recommandations, la valeur de ce rayon a été posée dans la présente étude de façon arbitraire à $r = 10$ mm, ce qui correspond à environ 150 voxels et respecte ainsi le cadre des recommandations de la littérature.

Enfin, une fois ce masque CPVL créé, il a été possible de vérifier s'il y avait des chevauchements significatifs entre (1) la ROI d'intérêt, en l'occurrence définie par le masque CPVL et (2) les activations après vs avant issues des trois contrastes d'intérêt décrits à la page 105 du présent mémoire. Cette technique d'analyse, aussi appelée « Small Volume Correction » (Poldrack, 2008), consiste à tester individuellement, pour chacun des trois contrastes préalablement obtenus, si des régions significativement plus activées dans chacun des trois contrastes coïncident

significativement avec la sphère définissant la ROI. Le test statistique utilisé a encore une fois été un test t sur échantillons pairés (Tong *et al.*, 2016) et le même seuil non corrigé de $p < ,0005$ a été utilisé. Par conséquent, les résultats des analyses par régions d'intérêt qui seront présentés au chapitre suivant utiliseront ce seuil.

La même démarche a été suivie pour identifier une région d'intérêt concernant l'hypothèse de la récupération en mémoire (H_3), mais en utilisant cette fois des mots-clés tels que *memory retrieval* dans l'algorithme de recherche. Quatre méta-analyses jugées pertinentes ont cette fois été recensées (Ciaramelli, Grady et Moscovitch, 2008; Kim, 2010; Spaniol *et al.*, 2009; Vilberg et Rugg., 2008). Les tâches de récupération en mémoire examinées par les études empiriques incluses dans ces quatre méta-analyses variaient en ce qui touche le type de stimuli utilisés dans la tâche (p. ex. : récupération de mots, de phrases, d'images, de formes géométriques, de paysages, etc.). Toutefois, ces tâches étaient globalement similaires en ce qui concerne les conditions comparées. Une condition consistait dans les stimuli récupérés avec succès en mémoire, et cette condition était comparée à des conditions de contrôle dans lesquelles il n'y avait pas de récupération réussie (p. ex. : stimuli non récupérés avec succès) ou dans lesquelles aucune récupération n'était demandée. Tout comme le consensus concernant le contrôle inhibiteur, il y avait consensus parmi ces quatre méta-analyses à l'effet que le pic d'activation le plus fortement associé (valeur ALE la plus élevée) à la récupération en mémoire se trouve dans le gyrus angulaire gauche/lobule pariétal inférieur gauche (BA 39/40). Toutefois, compte tenu encore une fois que ces quatre méta-analyses ne localisaient pas ce pic exactement au même endroit, tel qu'il ressort du tableau 3.4, des coordonnées moyennes de ce pic ont été calculées pour en arriver au résultat suivant :

$X = -43; Y = -67; Z = 42$ (dans espace de Talairach)

Tableau 3.4

Coordonnées des pics d'activation les plus fortement associés au mécanisme de récupération en mémoire lors de l'exécution de tâches de récupération de stimuli dans quatre méta-analyses

Auteurs	x	y	z
Ciaramelli, Grady et Moscovitch (2008)	-51	-57	32
Kim (2010)	-40	-74	24
Spaniol <i>et al.</i> (2009)	-40	-72	32
Vilberg & Rugg (2008)	-43	-66	38

Ainsi, concernant l'hypothèse de récupération en mémoire (H₃), un *masque* appelé GAG (pour gyrus angulaire gauche) a été créé utilisant l'option SPM Masking Toolbox. Tel que décrit précédemment, ce masque a consisté à créer une ROI consistant en une sphère placée dans le gyrus angulaire gauche/lobule pariétal inférieur gauche et ayant comme centre de gravité les coordonnées stéréotaxiques indiquées ci-dessus (X = -43; Y = -67; Z = 42) et possédant un rayon de 10 mm. Tous les autres détails concernant l'analyse pour cette ROI sont identiques à ceux décrits précédemment pour la ROI posée dans le cortex préfrontal ventrolatéral droit.

3.7 Considérations éthiques

Il convient dans un premier temps de souligner que ni l'auteur du présent mémoire, ni les collaborateurs ayant contribué à la collecte de données ou à d'autres étapes de la réalisation de l'étude, n'ont aucun conflit d'intérêts à déclarer en lien avec la présente étude. En outre, aucune difficulté ou point sensible de nature éthique ne semble soulevé par la présente étude. En effet, l'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle n'a démontré aucun risque connu, à ce jour, pour la santé humaine. L'usage de cette technique est de plus répandu en milieu clinique à travers le monde.

Il est vrai que les restrictions imposées par l'utilisation de l'IRMf ont pu causer un léger inconfort chez certains participants, par exemple le fait de devoir rester immobile pendant l'acquisition des images. À cet effet, des coussins ont notamment été placés sous la tête et en dessous des genoux des participants. Il en va de même pour le bruit causé par l'appareil, dont les effets incommodants ont pu être atténués par l'utilisation de bouchons auditifs. Par ailleurs, cette étude a reçu les approbations des comités d'éthique de l'Université du Québec à Montréal (UQAM) et de l'UNF. Enfin, il est à noter que tous les participants ont été dûment informés de l'objectif de cette étude, de ce que leur participation dans cette étude allait impliquer, de leur droit de ne pas participer ou de se retirer de l'étude à tout moment et de la confidentialité de leurs réponses. À ce sujet, le formulaire de consentement éthique est fourni à l'Annexe B du présent mémoire.

CHAPITRE IV

RÉSULTATS

L'objectif de la présente section est de présenter les résultats des analyses décrites dans la section précédente et de les interpréter en rapport avec la comparaison statistique après vs avant. Dans un premier temps seront présentés les résultats au niveau comportemental, concernant le taux d'exactitude et le temps de réaction. Dans un deuxième temps seront présentés les résultats au niveau cérébral, concernant l'analyse effectuée sur la totalité du cerveau (« whole-brain analysis ») et l'analyse effectuée sur les deux régions d'intérêt (CPVL droit et GAG).

4.1 Résultats au niveau comportemental

Les résultats au niveau comportemental, à savoir le taux d'exactitude moyen des participants et leur temps de réaction moyen au prétest et au posttest, sont présentés au tableau 4.1. En plus du calcul de statistiques descriptives (moyennes [M], écarts-types [SD]), les données ont fait l'objet d'un test t sur échantillons pairés (après vs avant). Des tailles d'effet (d de Cohen) ont également été calculées pour quantifier la magnitude de la différence entre le prétest et le posttest.

Au prétest, tel qu'attendu, il est ainsi possible d'observer que les novices ont présenté un taux d'exactitude moyen très faible autant pour les circuits naïfs ($M = 0,007$ sur 1; $SD = 0,082$) que pour les circuits scientifiques ($M = 0,039$ sur 1; $SD = 0,193$). En

revanche, toujours tel qu'attendu, les novices ont répondu correctement à la quasi-totalité des stimuli de contrôle ($M = 0,957$ sur 1; $SD = 0,204$). Également au prétest, leur temps de réaction moyen était, respectivement, de 2,763 s ($SD = 0,646$ s) pour les stimuli de type naïf, de 2,910 s ($SD = 0,662$ s) pour les stimuli de type scientifique, et de 2,663 s ($SD = 0,528$ s) pour les stimuli de contrôle.

Tableau 4.1

Moyennes (M) et écarts-types (SD) du taux d'exactitude (sur 1) et du temps de réaction (en s) des participants au prétest et au posttest en fonction du type de stimuli évalués et valeurs t de la comparaison statistique entre le prétest et le posttest

Type de stimulus	Taux d'exactitude (sur 1)			Temps de réaction (s)		
	Prétest <i>M (SD)</i>	Posttest <i>M (SD)</i>	<i>t</i>	Prétest <i>M (SD)</i>	Posttest <i>M (SD)</i>	<i>t</i>
Naïf	0,007 (0,082)	0,943 (0,232)	5,38*	2,763 (0,646)	2,718 (0,621)	-1,224
Scientifique	0,039 (0,193)	0,886 (0,318)	3,32*	2,910 (0,662)	2,768 (0,702)	-3,123*
Contrôle	0,957 (0,204)	0,954 (0,209)	-0,174	2,663 (0,528)	2,624 (0,560)	-1,082

Note. *Différence significative ($p < ,05$) entre le prétest et le posttest.

Au posttest, tel qu'attendu, il est possible d'observer que les novices ont présenté un taux d'exactitude moyen très élevé autant pour les circuits naïfs ($M = 0,943$ sur 1; $SD = 0,232$) que pour les circuits scientifiques ($M = 0,886$ sur 1; $SD = 0,318$), tout en maintenant un taux d'exactitude moyen très élevé pour les stimuli de contrôle ($M = 0,954$ sur 1; $SD = 0,209$). Les augmentations dans les taux d'exactitude ont été très

significatives autant pour les stimuli naïfs ($t[439] = 80,371; p < ,001; d = 5,38$) que pour les stimuli scientifiques ($t[439] = 47,016; p < ,001; d = 3,32$). En revanche, aucune différence significative entre les taux d'exactitude au posttest et au prétest n'a été observée pour les stimuli de contrôle ($t[439] = -0,174; p = ,862; d = -0,05$). Également au posttest, les temps de réaction moyens des participants étaient, respectivement, de 2,718 s ($SD = 0,621$ s) pour les stimuli de type naïf, de 2,768 s ($SD = 0,702$ s) pour les stimuli de type scientifique, et de 2,624 s ($SD = 0,560$ s) pour les stimuli de contrôle. Comparativement au prétest, les participants ont répondu significativement plus rapidement aux circuits scientifiques ($t[439] = -3,123; p = ,002; d = -0,21$), alors qu'aucune différence significative n'a été observée ni pour les circuits naïfs ($t[439] = -1,224; p = ,222; d = -0,07$) ni pour les circuits de contrôle ($t[439] = -1,082; p = ,280; d = -0,07$).

La grande magnitude de la taille d'effet (Howell, 2008) observée en comparant les taux d'exactitude au posttest, par rapport au prétest, permet de conclure que, au niveau comportemental à tout le moins, les novices ont effectivement réussi à surmonter leur conception alternative. En effet, au prétest, les novices répondaient systématiquement en conformité avec leur conception alternative correspondant au modèle de l'unipôle. Conséquemment, ils identifiaient systématiquement les circuits naïfs comme étant scientifiquement corrects, tandis qu'ils identifiaient systématiquement les circuits scientifiques comme étant scientifiquement incorrects. En revanche, au posttest, les novices répondaient systématiquement en conformité avec le modèle scientifique de circuit électrique. Conséquemment, ils identifiaient cette fois systématiquement les circuits naïfs comme étant scientifiquement incorrects, tandis qu'ils identifiaient systématiquement les circuits scientifiques comme étant scientifiquement corrects. L'examen du tableau 4.1 et celui des tailles d'effet d permet également d'observer que l'augmentation du taux d'exactitude est moins marquée pour les stimuli scientifiques ($d = 3,32$) que pour les stimuli naïfs ($d = 5,38$). En outre, le taux d'exactitude pour les stimuli scientifiques au posttest est

légèrement en deçà du seuil de 90 % (0,886), alors qu'il est considérablement au-delà de ce seuil pour les stimuli de type naïf (0,943).

Quant au temps de réaction, ce n'est que pour les stimuli de type scientifique qu'une différence significative a été observée entre le posttest et le prétest, les novices étant plus rapides au posttest. La magnitude de la taille d'effet décrivant cette différence est toutefois petite (Howell, 2008), en particulier lorsque comparée aux magnitudes des tailles d'effet observées pour les différences dans les taux d'exactitude.

4.2 Résultats au niveau cérébral

4.2.1 Résultats de l'analyse portant sur la totalité du cerveau

Les résultats de l'analyse portant sur la totalité du cerveau ou « whole-brain analysis », soit les trois contrastes d'intérêt décrits à la page 105, sont présentés au tableau 4.2 et illustrés à la figure 4.1. Il convient de rappeler que tous les résultats présentés ici sont significatifs à un seuil non corrigé de $p < ,0005$, que l'extension de toutes les activations est d'une taille minimale de $k > 5$ voxels, et que chacun des contrastes analysés tenait compte de l'activité cérébrale provoquée chez les participants par la fixation visuelle. Le tableau 4.2 et la figure 4.1 montrent ainsi d'abord que, lorsqu'ils évaluaient des stimuli naïfs au posttest, comparativement au prétest, les novices activaient davantage quatre groupes de régions cérébrales : (1) le cortex rostrofrontal à gauche et à droite (BA 10); (2) le gyrus angulaire/lobule pariétal inférieur, également à gauche et à droite (BA 39/40); (3) une région dans le cortex pariétal postérieur médian chevauchant le précunéus et le cortex cingulaire postérieur (BA 7/23/31); (4) une région sous-corticale dans les ganglions basaux, chevauchant le putamen et le globus pallidus à gauche et à droite (les ganglions basaux ne reçoivent pas de numéro dans la nomenclature de Brodmann). Parmi ces activations,

l'activation bilatérale du cortex rostrofrontal (BA 10) demeurait significative même au seuil corrigé au niveau du « cluster », avec respectivement des valeurs de $p_{\text{FWE-corr cluster}} = ,042$ à gauche et de $p_{\text{FWE-corr cluster}} = ,024$ à droite, mais devenait non significative au niveau du « peak » aussi bien à gauche ($p_{\text{FWE-corr peak}} = ,274$) qu'à droite ($p_{\text{FWE-corr peak}} = ,537$). Également, l'activation chevauchant le précunéus et le cortex cingulaire postérieur demeurait très significative au seuil corrigé au niveau du « cluster » ($p_{\text{FWE-corr cluster}} < ,001$), mais devenait non significative au niveau du « peak » ($p_{\text{FWE-corr peak}} = ,215$).

Lorsqu'ils évaluaient des stimuli scientifiques au posttest, comparativement au prétest, les novices activaient davantage deux régions cérébrales contigues, soit le cortex cingulaire postérieur (BA 23/31) et le précunéus (BA 7). Aucune de ces deux activations ne demeurait cependant significative au seuil corrigé ni au niveau du « cluster » ni au niveau du « peak ». En effet, pour l'activation cingulaire postérieure, les tests de significativité statistique au seuil corrigé donnaient respectivement $p_{\text{FWE-corr cluster}} = ,505$ et $p_{\text{FWE-corr peak}} = ,783$. Pour l'activation précunéale, les tests de significativité statistique au seuil corrigé donnaient respectivement $p_{\text{FWE-corr cluster}} = ,170$ et $p_{\text{FWE-corr peak}} = ,545$. Enfin, lorsqu'ils évaluaient des stimuli de contrôle au posttest, comparativement au prétest, les novices activaient davantage une seule région cérébrale, soit le gyrus angulaire gauche/lobule pariétal inférieur gauche (BA 39/40). Toutefois, cette activation ne demeurait pas significative au seuil corrigé ni au niveau du « cluster » ($p_{\text{FWE-corr cluster}} = ,440$) ni au niveau du « peak » ($p_{\text{FWE-corr peak}} = ,841$). Enfin, au seuil non corrigé, aucune région cérébrale n'était significativement *moins* activée au posttest comparativement au prétest pour aucun des trois types de stimuli.

4.2.2 Résultats de l'analyse portant sur les régions d'intérêt

Le but de ces analyses était de tester (1) l'hypothèse H_2 , en rapport avec une activation du cortex préfrontal ventrolatéral droit (CPVL) sous-tendant le mécanisme de contrôle inhibiteur et (2) l'hypothèse H_3 , en rapport avec une activation du gyrus angulaire gauche (GAG) sous-tendant le mécanisme de récupération en mémoire. Pour ce faire, il a été analysé statistiquement si les activations observées dans chacun des trois contrastes après vs avant (stimuli naïfs, scientifiques et de contrôle) coïncidaient significativement ou non avec une région d'intérêt définie dans le CPVL et dans le GAG. Un seuil non corrigé de $p < ,0005$ a été utilisé.

D'abord, en ce qui touche les stimuli naïfs, cette analyse a permis de déterminer que le CPVL n'était pas significativement plus activé au posttest, comparativement au prétest, pour l'évaluation de ce type de stimuli. En revanche, toujours pour les stimuli naïfs, cette analyse a permis de déterminer que le GAG était significativement plus activé au posttest, comparativement au prétest, lors de l'évaluation de ce type de stimuli. De plus, cette activation demeurait significative au seuil corrigé autant au niveau du « cluster » ($p_{\text{FWE-corr cluster}} = ,013$) qu'au niveau du « peak » ($p_{\text{FWE-corr peak}} = ,026$). Puis, en ce qui concerne les stimuli scientifiques, cette analyse a permis de déterminer que ni le CPVL ni le GAG n'étaient significativement plus activés au posttest, comparativement au prétest, pour l'évaluation de ce type de stimuli. Enfin, en ce qui a trait aux stimuli de contrôle, cette analyse a permis de déterminer que le CPVL n'était pas significativement plus activé au posttest, comparativement au prétest, pour l'évaluation de ce type de stimuli. Toutefois, toujours pour les stimuli de contrôle, cette analyse a permis de déterminer que le GAG était significativement plus activé au posttest, comparativement au prétest, lors de l'évaluation de ce type de stimuli. Comme pour les stimuli naïfs, cette activation demeurait en outre significative au seuil corrigé autant au niveau du « cluster » ($p_{\text{FWE-corr cluster}} = ,006$) qu'au niveau du « peak » ($p_{\text{FWE-corr peak}} = ,008$).

Tableau 4.2

Régions cérébrales significativement plus activées au posttest comparativement au prétest en fonction du type de stimuli évalués et valeurs t de la comparaison statistique*

Région cérébrale	k	x	y	z	t	p
Stimuli naïfs_{posttest} – Stimuli naïfs_{prétest}						
Cortex cingulaire postérieur (BA 31)**	147	-12	-63	27	5,62	<,001
Cortex rostrofrontal gauche (BA 10)**	43	-36	57	6	5,47	<,001
Précunéus / Cortex cingulaire postérieur (BA 7/23)	21	-3	-45	24	5,16	<,001
Putamen/Globus pallidus droits	23	24	0	-3	5,09	<,001
Cortex rostrofrontal droit (BA 10)**	51	36	57	-3	4,98	<,001
Gyrus angulaire droit / Lobule pariétal inférieur (BA 39/40)	29	63	-48	42	4,67	<,001
Putamen / Globus pallidus gauches	6	-24	-6	-6	4,39	<,001
Cortex cingulaire postérieur (BA 23/31)	9	-9	-48	36	4,30	<,001
Gyrus angulaire gauche / Lobule pariétal inférieur (BA 39/40)	12	-42	-63	48	4,17	<,001
Stimuli scientifiques_{posttest} – Stimuli scientifiques_{prétest}						
Précunéus (BA 7)	29	15	-60	27	4,84	<,001
Cortex cingulaire postérieur (BA 23/31)	13	-12	-63	36	4,46	<,001
Stimuli contrôle_{posttest} – Stimuli contrôle_{prétest}						
Gyrus angulaire gauche/lobule pariétal inférieur (BA 39/40)	14	-45	-69	48	4,47	<,001

Note. *Activation de toutes les régions indiquées dans le tableau est significative au niveau du « peak » au seuil non corrigé de $p < ,0005$. **Régions dont l'activation demeure significative au niveau du « cluster » même au seuil corrigé $p_{FWE-corr} < ,05$.

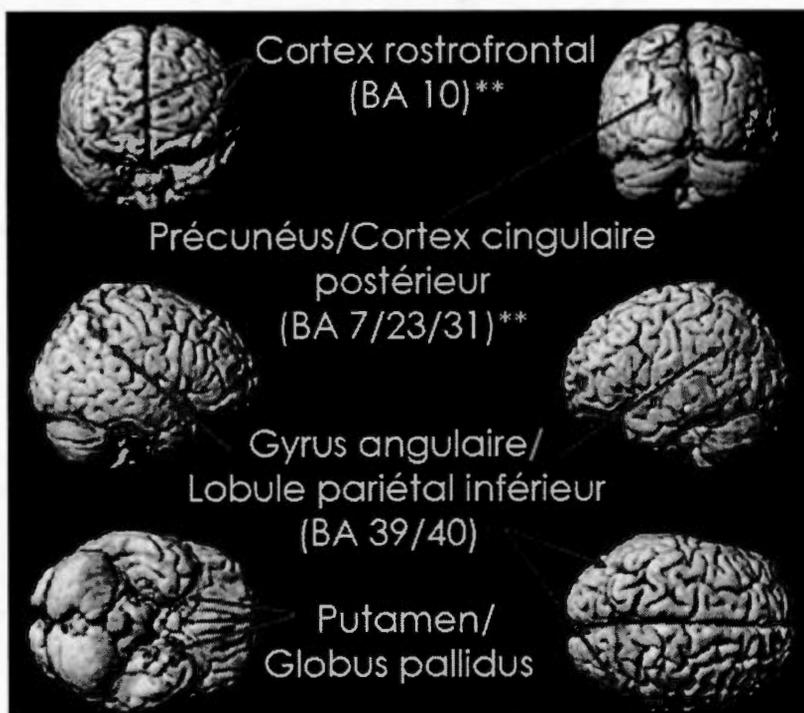


Figure 4.1. Régions cérébrales significativement plus activées au posttest, comparativement au prétest, lors de l'évaluation des stimuli naïfs. Activation de toutes les régions indiquées dans la figure est significative au niveau du « peak » au seuil non corrigé de $p < ,0005$. **Régions dont l'activation demeure significative au niveau du « cluster » même au seuil corrigé $p_{\text{FWE-corr}} < ,05$.

CHAPITRE V

DISCUSSION

L'objectif du présent chapitre consiste à discuter des résultats présentés dans le chapitre précédent et à les mettre en lien avec les hypothèses de recherche et la littérature pertinente préalablement décrite au chapitre 2. Pour ce faire, dans un premier temps, le présent chapitre se penchera sur la validation des trois hypothèses de recherche afin de les confirmer ou de les infirmer. Dans un deuxième temps, une interprétation détaillée de la signification des activations cérébrales observées sera présentée. Dans un troisième temps, les résultats de la présente étude seront mis en lien avec certains postulats de modèles de changement conceptuel, puis avec les études neuroscientifiques préalables afin de faire ressortir des implications pour l'enseignement et l'apprentissage des sciences. Enfin, dans un quatrième temps, il sera question des limites de la présente étude.

5.1 Validation des hypothèses de recherche

5.1.1 Hypothèse H₁

L'hypothèse non nulle H₁ consistait à postuler que le temps de réaction moyen des novices au posttest, comparativement au prétest, serait plus long à cause de la mobilisation du mécanisme de contrôle inhibiteur pour résister à leur tendance à répondre en conformité avec leur conception alternative. Or, les résultats décrits au

chapitre précédent n'appuient pas cette hypothèse. En effet, pour les stimuli naïfs, aucune différence significative dans le temps de réponse moyen n'a été observée entre le prétest et le posttest ($p \gg ,05$). La taille d'effet ($d = -0,07$) représentant la magnitude de cette différence suggère même, possiblement, un temps de réaction légèrement plus rapide au posttest. Dans la même veine, concernant les stimuli scientifiques, les novices ont été significativement plus rapides au posttest comparativement au prétest ($p < ,05$). De surcroît, la magnitude de la taille d'effet ($d = -0,21$) décrivant cette différence suggère, considérablement plus que pour les stimuli naïfs, un temps de réaction plus rapide au posttest. Par conséquent, l'hypothèse non nulle H_1 est rejetée, et l'hypothèse nulle correspondante H_{01} est acceptée. Les résultats portant sur le temps de réaction ne suggèrent donc pas une mobilisation du mécanisme de contrôle inhibiteur.

5.1.2 Hypothèse H_2

L'hypothèse non nulle H_2 consistait à postuler qu'une activation significativement plus grande des régions cérébrales sous-tendant le mécanisme de contrôle inhibiteur, soit le CCA, le CPDL et le CPVL serait observée au posttest, comparativement au prétest. Or, les résultats obtenus autant par l'analyse portant sur la totalité du cerveau (« whole-brain analysis ») que par l'analyse par ROI portant spécifiquement sur le CPVL tendent à infirmer cette hypothèse également. D'abord, l'analyse portant sur la totalité du cerveau n'a permis d'observer aucune activation plus grande au posttest de l'une des trois régions cérébrales impliquées dans le mécanisme de contrôle inhibiteur, et ce, ni pour l'évaluation des stimuli naïfs ni pour l'évaluation des stimuli scientifiques. De surcroît, l'analyse par ROI portant sur la région du CPVL, qui est la plus fortement associée au contrôle inhibiteur, a permis de trianguler ce résultat. En effet, cette analyse n'a pas permis d'observer d'activation significative du CPVL ni pour les stimuli naïfs ni pour les stimuli scientifiques. Or, tel qu'abordé au chapitre 3

du présent mémoire, le CPVL est la région la plus fortement associée par les différentes méta-analyses à l'implémentation du contrôle inhibiteur. Par exemple, la méta-analyse de Buchsbaum *et al.* (2005), qui a porté sur la tâche du Go/No-go, rapporte que le groupement de voxels (« cluster ») le plus proéminent activé à travers les études lors de l'exécution de cette tâche se trouve dans le CPVL droit. Le volume de ce « cluster » (13 427 mm³) est quatre fois plus grand que celui de la région cérébrale étant la deuxième la plus associée à l'exécution du Go/No-go. Similairement, la méta-analyse de Simmonds *et al.* (2008), ayant également examiné la tâche du Go/No-go, arrive au même résultat et rapporte que le volume du cluster (7 464 mm³) le plus proéminent associé à l'exécution de cette tâche se trouve dans le CPVL droit. Par conséquent, pour les raisons énumérées dans ce paragraphe, l'hypothèse non nulle H₂ est rejetée, et l'hypothèse nulle correspondante H₀₂ est acceptée. Les résultats portant sur l'activité cérébrale ne suggèrent donc pas une mobilisation du mécanisme de contrôle inhibiteur.

5.1.3 Hypothèse H₃

L'hypothèse non nulle H₃ consistait à postuler qu'une activation significativement plus grande d'une région cérébrale (gyrus angulaire gauche ou GAG) sous-tendant le mécanisme de récupération en mémoire serait observée au posttest, comparativement au prétest. Il s'avère que les résultats obtenus autant par l'analyse portant sur la totalité du cerveau (« whole-brain analysis ») que par l'analyse par ROI tendent cette fois à confirmer cette hypothèse.

Dans un premier temps, la confirmation de cette hypothèse est suggérée par l'analyse portant sur la totalité du cerveau (« whole brain analysis »). Cette analyse permet en effet d'observer une activation bilatérale, significative au seuil corrigé, du cortex rostrofrontal (BA 10). Or, bien que le type précis de récupération en mémoire n'eût

pas fait partie de l'hypothèse H₃ a priori, l'activation de cette région est quasi ubiquitaire à travers les études empiriques neuroscientifiques qui ont utilisé une tâche nécessitant de la *récupération en mémoire épisodique* de divers stimuli appris au préalable. Le concept de *récupération en mémoire épisodique*, dans le contexte de ces études, peut se définir dans un sens général comme le fait de se souvenir de certaines caractéristiques d'une série de stimuli (p. ex. : mots, phrases, images) appris au préalable lors d'une phase d'encodage. Il s'agit donc ici d'une « mémoire des stimuli de laboratoire », et non d'une mémoire concernant des souvenirs authentiques de la vie des participants. Ce concept de récupération en mémoire épisodique sera défini plus en détail et mis en relation avec les activations cérébrales observées dans la présente étude à la section suivante, soit 5.2.1.

Pour en revenir à l'activation très significative des BA 10 observée dans la présente étude, quantité de méta-synthèses (p. ex.: Buckner *et al.*, 1998; Cabeza et Nyberg, 2000; Desgranges, Baron et Eustache, 1998; Fletcher, Frith et Rugg, 1997; Fletcher et Henson, 2001; Gilboa, 2004) et méta-analyses (p. ex. : Andrews-Hanna *et al.*, 2014; Ciaramelli *et al.*, 2008; Kim, 2010; Spaniol *et al.*, 2009; Vilberg et Rugg, 2008) portant sur la mémoire épisodique ont conclu à un rôle important joué par la BA 10 lors de la phase de récupération en mémoire épisodique. Il en va de même pour certaines méta-analyses ayant examiné les fonctions du cortex préfrontal (p. ex. : Burgess *et al.*, 2007; Duncan et Owen, 2000; Gilbert *et al.*, 2006; Grady *et al.*, 1999), qui ont associé fortement l'activation de la BA 10 à la récupération en mémoire épisodique. À titre d'exemple, la méta-analyse de Spaniol *et al.* (2009), qui a porté sur les tâches de récupération en mémoire épisodique, rapporte que des « clusters » proéminents sont activés à travers les études empiriques primaires autant dans la BA 10 droite (568 mm³) que dans la BA 10 gauche (216 mm³), bien que ces volumes soient moins proéminents que ceux rapportés pour les gyri angulaires.

L'analyse portant sur la totalité du cerveau (« whole brain analysis ») permet également d'observer une activation bilatérale des gyri angulaires/lobules pariétaux inférieurs (BA 39/40). En outre, l'analyse par ROI a permis de confirmer, au seuil corrigé $P_{FWE-corr}$, l'activation du gyrus angulaire gauche/lobule pariétal inférieur gauche. À l'instar de la BA 10, quantité de méta-synthèses (p. ex. : Cabeza et Nyberg, 2000; Desgranges *et al.*, 1998; Fletcher et Henson, 2001) et méta-analyses (p. ex. : Andrews-Hanna, Saxe et Yarkoni, 2014; Cabeza, Ciaramelli, Olson et Moscovitch, 2008; Ciaramelli *et al.*, 2008; Kim, 2010; Spaniol *et al.*, 2009; Vilberg et Rugg, 2008) portant sur la mémoire épisodique ont conclu à un rôle important joué par les gyri angulaires, le gauche particulièrement, lors de la phase de récupération en mémoire épisodique. Il en va de même pour certaines méta-synthèses ayant examiné les fonctions du gyrus angulaire gauche (p. ex. : Seghier, 2013; Seghier, Fagan et Price, 2010), qui ont associé fortement l'activation du gyrus angulaire gauche à la récupération en mémoire épisodique. À titre d'exemple, la méta-analyse de Spaniol *et al.* (2009), qui a porté sur les tâches de récupération en mémoire épisodique, rapporte que le « cluster » le plus proéminent (8 656 mm³) activé à travers les études empiriques primaires se trouve dans la région notamment du gyrus angulaire gauche / lobule pariétal inférieur gauche lors de la récupération en mémoire épisodique réussie. Tel qu'il sera décrit au paragraphe suivant, cet imposant « cluster » chevauche en fait aussi le précunéus (BA 7), qui se trouve dans le lobule pariétal supérieur.

Concernant ce dernier point, l'analyse portant sur la totalité du cerveau (« whole brain analysis ») permet également d'observer une activation importante, significative au seuil corrigé, de groupements de voxels dans le précunéus (BA 7) et dans le cortex cingulaire postérieur (BA 23/31). Tout comme le cortex rostrofrontal et les gyri angulaires, ces activations sont fortement associées, dans la littérature scientifique, à une récupération en mémoire épisodique (p. ex. : Ciaramelli *et al.*, 2010; Leech et Sharp, 2014; Robin *et al.*, 2014). À l'instar de ce qui a été décrit précédemment,

plusieurs méta-analyses ayant examiné la récupération en mémoire épisodique soutiennent cette conclusion (p. ex. : Cabeza *et al.*, 2008; Kim, 2010; Spaniol *et al.*, 2009; Vilberg et Rugg, 2008). À titre d'exemple, dans la méta-analyse de Spaniol *et al.* (2009), le « cluster » le plus proéminent déjà décrit au paragraphe précédent (8 656 mm³) se trouve de façon superposée sur le lobule pariétal inférieur gauche et également sur le précunéus (BA 7), dans le lobule pariétal supérieur médian. En outre, un autre parmi les « clusters » les plus proéminents dans la méta-analyse de Spaniol *et al.*, toujours en lien avec la récupération en mémoire épisodique, se trouve dans le cortex cingulaire postérieur (BA 31) et a une taille de 2 736 mm³.

Enfin, plusieurs des méta-analyses citées ci-dessus (p. ex. : Spaniol *et al.*, 2009; Kim, 2010) ont conclu à une coactivation des BA 39/40, des BA 10 et des BA 7/23/31 durant la récupération en mémoire épisodique, soutenant a fortiori l'hypothèse H₃. Par conséquent, pour cette raison et pour toutes les raisons énumérées dans les deux paragraphes précédents, l'hypothèse non nulle H₃ est acceptée, et l'hypothèse nulle correspondante H₀₃ est rejetée. Les résultats portant sur l'activité cérébrale suggèrent donc une mobilisation du mécanisme de récupération en mémoire épisodique. La section suivante décrira plus en détail ce mécanisme et établira des liens plus approfondis avec les activations cérébrales observées dans la présente étude.

5.2 Interprétation des activations cérébrales observées

5.2.1 Mémoire épisodique

Tel qu'inféré ci-dessus, le mécanisme cognitif semblant expliquer le plus plausiblement les activations observées au posttest, comparativement au prétest, semble être celui de récupération en mémoire épisodique. Cela n'est pas étonnant, puisqu'un rapprochement évident semble pouvoir se faire entre la tâche employée

dans la présente étude et des tâches classiques retrouvées dans la littérature neuroscientifique qui ont examiné les activations cérébrales associées à la récupération en mémoire épisodique. Il est à souligner que la récupération en mémoire épisodique examinée dans cette littérature peut se scinder dans les deux types suivants : (1) la récupération en mémoire épisodique autobiographique, qui consiste à récupérer ou à se souvenir du contenu d'un événement authentique vécu dans son passé (p. ex. : premier jour d'école) et (2) la récupération en mémoire épisodique « artificielle », qui consiste à récupérer ou à se souvenir du contenu d'un événement artificiel, comme celui vécu dans un laboratoire de neuroimagerie (Gilboa, 2004). Sauf avis contraire, c'est de ce deuxième type de récupération qu'il sera question dorénavant dans cette discussion, puisque c'est ce type qui se rapproche le plus de la tâche utilisée dans la présente étude. Par souci de simplicité, le terme *récupération épisodique* sera utilisé par endroits, au lieu de *récupération en mémoire épisodique*.

La tâche classique utilisée par les études neuroscientifiques qui ont examiné les activations cérébrales associées à une récupération en mémoire épisodique est la tâche de jugement de reconnaissance. Cette tâche consiste, lors d'une phase de récupération, à récupérer en mémoire épisodique des épithètes ou caractéristiques de stimuli préalablement étudiés lors d'une phase d'encodage (Bernbach, 1967; Cabeza *et al.*, 2008; Ciaramelli *et al.*, 2010; Jahromi, 2013; Kintsch, 1970; Tulving et Thomson, 1971). Cette phase d'encodage équivaut ainsi à un événement (artificiel) vécu dans le passé du participant. À titre d'exemple, lors d'une tâche de jugement de reconnaissance traditionnelle, les participants sont d'abord assujettis à un événement consistant à étudier une série d'items ou stimuli présentés à l'écran (mots, phrases, images, formes géométriques, paysages, etc.). Cela correspond à la phase d'encodage. À la suite de cette phase, les participants sont assujettis à une phase de récupération lors de laquelle une série d'items sont encore présentés à l'écran. Ces items sont un mélange d'items préalablement étudiés lors de l'encodage (vieux items) et d'items ne

faisant pas partie de la série d'items étudiés (items nouveaux). Les participants doivent ainsi déterminer si les items présentés lors de la phase de récupération sont vieux (corrects) ou nouveaux (incorrects). Une grande variété de types d'items ont été utilisés dans la littérature neuroscientifique pour ce type de tâche, par exemple des mots (Andreasen *et al.*, 1995c; Buckner *et al.*, 1995; de Zubicaray *et al.*, 2005; Fletcher *et al.*, 1995; Fliessbach *et al.*, 2006; Henson, Hornberger et Rugg, 2005; Kapur *et al.*, 1995; Nyberg *et al.*, 1995, 1996), des phrases (Sestieri, Corbetta, Romani et Shulman, 2011), des visages (Andreasen *et al.*, 1996; Haxby *et al.*, 1996; Leube *et al.*, 2003; Nichols, Kao, Verfaellie et Gabrieli, 2006), des objets (Moscovitch, Kapur, Kohler et Houle, 1995; Owen, Milner, Petrides et Evans, 1996), des images (Achim et Lepage, 2005; Morcom, Li et Rugg, 2007; Tulving *et al.*, 1996), ou bien encore des formes géométriques complexes (Petersson, Elfgrén et Ingvar, 1997; Roland et Gulyas, 1995).

Or, les similarités entre ce type de tâche et la tâche utilisée dans la présente étude semblent être nombreuses. Les novices en électricité ont été assujettis à une intervention consistant à leur présenter à l'écran une série de stimuli représentant les réponses scientifiquement correctes de chacun des types de circuits électriques, ce qui s'apparente à une phase d'étude ou d'encodage. Également, au posttest, une série de stimuli étaient présentés à l'écran et les novices devaient récupérer une épithète (correct ou incorrect) associée à ces stimuli afin de fournir une réponse. Il faut souligner que plusieurs variantes de la tâche de jugement de reconnaissance classique existent (Cabeza et Nyberg, 2000), comme l'étude de paires d'items (p. ex. : paire de mots) plutôt que d'items individuels et le fait de devoir ensuite déterminer si la paire présentée à l'écran présente une association correcte (vieuse) ou incorrecte (nouvelle). Une autre variante à mentionner est la tâche de jugement de source, dans laquelle les participants, plutôt que d'effectuer une récupération basée sur des épithètes de l'item, doivent plutôt récupérer des informations liées au contexte dans lequel l'item a été étudié lors de la phase d'encodage. Ce type d'informations contextuelles peut être la

localisation spatiale de l'item à l'écran (p. ex. : à gauche vs à droite) ou dans la séquence temporelle de présentation de l'item (p. ex. : présenté vers le début ou vers la fin de la série lors de l'encodage). D'autres variantes de la tâche de jugement de reconnaissance existent également, comme une récupération lors de laquelle aucun item ou stimulus n'est présenté à l'écran, cette variante étant nommée « recall ». Toutes ces variantes ne semblent cependant pas s'apparenter à la tâche utilisée dans la présente étude. Par conséquent, au cours de la présente discussion, il sera dorénavant essentiellement question de la tâche de jugement de reconnaissance, sauf en cas d'avis explicite allant dans le sens contraire.

Bref, compte tenu (1) de l'acceptation de l'hypothèse H_3 liée à une récupération en mémoire épisodique et (2) des similarités manifestes entre la tâche de jugement de reconnaissance et la tâche utilisée dans la présente étude, les prochaines sections tenteront d'interpréter les activations cérébrales observées dans la présente étude en établissant des liens avec les connaissances et théories issues des études neuroscientifiques ayant porté principalement sur la tâche de jugement de reconnaissance. À certains endroits, lorsque pertinent, des variantes de cette tâche, (p. ex. : jugement de source) seront également discutées pour établir des liens.

5.2.2 Interprétation des activations cérébrales observées en rapport avec la récupération en mémoire épisodique

5.2.2.1 Théories concernant l'activation du cortex rostrofrontal (BA 10)

Plusieurs théories existent dans la littérature neuroscientifique au regard du rôle que jouerait le cortex rostrofrontal (BA 10) dans le mécanisme de récupération en mémoire épisodique. Ces théories seront discutées une à une, puis il sera argumenté laquelle semble expliquer, le plus plausiblement, les activations des BA 10 observées dans la présente étude.

Il a été proposé que ces différents rôles postulés pourraient être classés en deux catégories de processus (Fletcher et Henson, 2001; Rugg et Henson, 2002; Simons et Spiers, 2003) : (1) des processus de prérécupération ou « preretrieval », qui opèrent en soutien de la tentative de récupérer de l'information préalablement encodée en mémoire épisodique, mais qui agissent avant le moment précis de la récupération *per se*; (2) des processus de postrécupération ou « postretrieval », qui opèrent sur les produits de la récupération en mémoire épisodique et qui agissent donc après la récupération *per se*. Concernant la prérécupération, les trois théories les plus documentées dans la littérature pour expliquer l'activation du cortex rostrofrontal sont les suivantes :

(1) l'adoption d'un *mode* de récupération ou « retrieval mode » (Cabeza et Nyberg, 2000; Duzel *et al.*, 1999; Lepage, Ghaffar, Nyberg et Tulving, 1999; Nyberg *et al.*, 1996; Tulving *et al.*, 1994b; Ranganath et Knight, 2011; Rugg et Wilding, 2000);

(2) l'*orientation* de la récupération ou « retrieval orientation » (Johnson, 1992; Rugg et Wilding, 2000);

(3) un *effort* accru de récupération ou « retrieval effort » (Cabeza et Nyberg, 2000; Moscovitch et Winocur, 2002; Stevens et Grady, 2007; Schacter *et al.*, 1996; Rugg et Wilding, 2000).

Concernant la postrécupération, deux théories semblent être particulièrement documentées dans la littérature :

(4) le *succès* de la récupération ou « retrieval success » (Buckner *et al.*, 1998; Cabeza et Nyberg, 2000; Rugg et Wilding, 2000)

(5) enfin, la *surveillance* après récupération ou « *postretrieval monitoring* » (Allan, Dolan, Fletcher et Rugg, 2000; Gilboa, 2004; Henson, Shallice et Dolan, 1999b; Henson, Shallice, Josephs et Dolan, 2002; Koriat et Goldsmith, 1996; Rugg, Henson et Robb, 2003; Stevens et Grady, 2007).

Le *mode* de récupération (« *retrieval mode* ») est l'adoption et le maintien de l'état cognitif dans lequel le participant se place lorsqu'il focalise et maintient son attention sur un événement précis vécu dans le passé (Cabeza et Nyberg, 2000; Rugg et Wilding, 2000). Cette théorie se base, par exemple, sur des études neuroscientifiques ayant comparé (1) l'activité cérébrale des participants observée dans une tâche de contrôle, comme lire un texte (p. ex. : Nyberg *et al.*, 1995; Wagner *et al.*, 1998), porter un jugement de catégorisation sémantique (e.g., Kapur *et al.*, 1995b; Rugg *et al.*, 1997a) ou simplement réaliser une fixation visuelle (Buckner *et al.*, 1998) versus (2) l'activité cérébrale observée dans une tâche de jugements de reconnaissance. Une activation plus grande de la BA 10 était observée par ces études dans le deuxième cas. Or, cette théorie semble pouvoir expliquer de façon satisfaisante l'activation de la BA 10 observée dans la présente étude. En effet, tel que déjà abordé, les novices performaient au posttest une tâche s'apparentant à un jugement de reconnaissance, lors duquel ils avaient à poser les épithètes *Correct* ou *Incorrect* sur des stimuli préalablement appris lors de la phase d'encodage ou de présentation des réponses correctes. Il est donc plausible que les novices aient été dans un *mode* de récupération au posttest, comparativement au prétest où ils n'avaient pas encore reçu les réponses correctes et n'étaient vraisemblablement pas dans un *mode* de récupération.

L'*orientation* de la récupération (« *retrieval orientation* ») peut être considérée comme une sous-partie du *mode* de récupération et réfère à l'implication de processus cognitifs différents en fonction des instructions et des types de stimuli précis impliqués dans la tâche de jugement de reconnaissance (Johnson, 1992; Moscovitch et Winocur, 2002; Rugg et Wilding, 2000). Des activations cérébrales différentes sont

ainsi provoquées par l'utilisation de différents types de stimuli, comme le fait d'avoir encodé des images versus des mots dans la phase d'encodage, ou par l'utilisation de différentes instructions, comme le fait de devoir performer un jugement de reconnaissance vs un jugement de source. À titre d'exemple, certaines études ont comparé l'activité cérébrale des participants lorsqu'ils étaient (1) instruits à performer la tâche traditionnelle de jugement de reconnaissance d'items versus (2) lorsqu'ils étaient instruits à performer des jugements de source portant sur le contexte d'encodage, comme déterminer si un item avait été présenté à gauche ou à droite sur l'écran ou dans quel ordre temporel un item se trouvait dans la séquence de présentation lors de l'encodage (Henson *et al.*, 1999; Nolde, Johnson et Raye, 1998; Rugg, Fletcher, Chua et Dolan, 1999). Une activation plus grande de la BA 10 était alors observée dans la deuxième condition, par rapport à la première. Cette observation a mené certains auteurs à conclure que « Compared with old/new recognition, source identification decisions require more episodic information (e.g. time, place, [...]) and tend to be more reflectively demanding » (Nolde *et al.*, 1998, p. 400) et que « frontal cortex directs goal-oriented strategies that lead to the recovery of [...] information » (Moscovitch et Winocur, 2002, p. 194). Toutefois, cette théorie semble moins plausible pour expliquer les résultats obtenus dans la présente étude. Le principal argument en défaveur de l'application de cette théorie est à l'effet que les novices de la présente étude n'avaient pas à performer un jugement de source, comme de déterminer la localisation d'un stimulus à l'écran, mais bien plus un jugement de reconnaissance, à savoir attribuer l'épithète *Correct* ou *Incorrect* aux stimuli présentés. Ainsi, tel que déjà décrit précédemment, la tâche de jugement de source ne semble tout simplement pas s'apparenter suffisamment à la tâche utilisée dans la présente étude.

L'*effort* de récupération ou « retrieval effort » peut se définir comme la demande plus grande imposée sur les ressources cognitives par un essai de récupération en mémoire (Rugg et Wilding, 2000; Stevens et Grady, 2007). Cette théorie se base, notamment,

sur des études qui ont manipulé le niveau de difficulté de la tâche de récupération afin de comparer l'activité cérébrale des participants durant (1) les essais de récupération plus difficiles versus (2) les essais de récupération plus faciles. Pour ce faire, ces études créaient généralement deux types de conditions lors de l'encodage, par exemple des items simplement appris ou « simply learnt » vs des items surappris ou « overlearnt » (p. ex. : Andreasen *et al.*, 1995a, 1995b), ou bien encore des items appris superficiellement vs profondément (Buckner *et al.*, 1998; Schacter *et al.*, 1996b). Les items surappris étaient des items présentés à plusieurs reprises lors de la phase d'encodage, tandis que les items simplement appris consistaient en des items présentés à une seule reprise. Les items appris profondément consistaient en des items étudiés en profondeur lors de l'encodage, par exemple en focalisant l'attention des participants sur le sens de ces items (p. ex. : sens de mots), tandis que les items appris superficiellement consistaient en des items étudiés de façon négligente, par exemple en focalisant l'attention des participants sur l'apparence de ces items (p. ex. : type de lettres). Ces études ont constaté que les essais de récupération subséquents des items simplement appris ou appris superficiellement, essais plus difficiles cognitivement, étaient associés à une activation plus grande de la BA 10.

Cependant, cette théorie non plus ne semble pas expliquer de façon satisfaisante l'activation des BA 10 observée dans la présente étude. Le principal argument, cette fois, est la contradiction entre les résultats au niveau comportemental et cérébral de la présente étude, contradiction qui joue en défaveur de la théorie de l'effort de récupération. D'abord, les résultats au niveau comportemental suggèrent que la récupération de la réponse correcte pour les stimuli scientifiques, comparativement aux stimuli naïfs, semble avoir été plus difficile cognitivement pour les novices. L'amélioration constatée dans le taux d'exactitude entre le prétest et le posttest semble effectivement moins élevée pour les stimuli scientifiques ($d = 3,32$) par rapport aux stimuli naïfs ($d = 5,38$). Cela suggère donc que la récupération de la réponse correcte pour les stimuli scientifiques exigeait possiblement plus d'effort

cognitif de la part des participants. Pourtant, une activation de la BA 10 a été observée lors de l'évaluation des stimuli naïfs au posttest, et non lors de l'évaluation des stimuli scientifiques, contredisant ainsi la théorie de l'effort de récupération.

Le succès de la récupération ou « retrieval success » concerne l'activation des processus cognitifs sélectivement engagés lorsqu'un essai de récupération en mémoire épisodique est réussi. Cette théorie repose, notamment, sur des études qui ont manipulé le taux de succès (ou taux d'exactitude) des participants durant la phase de récupération pour comparer l'activité cérébrale lors (1) d'une condition à haut taux de succès vs (2) une condition à bas taux de succès. Pour ce faire, ces études ont créé soit deux conditions différentes d'encodage, comme l'apprentissage superficiel vs profond des items déjà décrit (p. ex. : Buckner *et al.*, 1998; Staresina, Bauer, Deecke et Walla, 2005), ou bien encore deux conditions différentes de récupération, comme la présence lors de la phase de récupération d'une proportion élevée vs faible d'items préalablement appris lors de la phase d'encodage (p. ex. : Rugg *et al.*, 1996, 1998, 1999). Les conditions d'apprentissage profond et de proportion élevée d'items préalablement appris donnaient lieu à un taux de succès beaucoup plus élevé lors de la récupération, et une activation plus grande de la BA 10 était alors observée.

Toutefois, cette théorie non plus ne semble pas expliquer de façon satisfaisante l'activation des BA 10 observée dans la présente étude. Le principal argument, cette fois, est à l'effet que, au sein des études citées dans ce paragraphe, la différence du taux de succès entre les conditions à haut taux de succès et à bas taux de succès devait être très considérable (p. ex. : 85,4 % vs 47,1 % dans Buckner *et al.*, 1998) pour observer une activation de la BA 10. Or, dans la présente étude, la différence entre le taux d'exactitude ou de succès aux stimuli naïfs (94,3 %) et scientifiques (88,6 %) est beaucoup plus faible au posttest, et les deux taux sont élevés. Malgré cela, une activation des BA 10 est néanmoins observée pour les stimuli naïfs, mais pas pour les

stimuli scientifiques. Ces observations vont donc à l'encontre de la théorie du *succès* de récupération.

Enfin, la dernière théorie est possiblement celle pouvant expliquer le mieux l'activation des BA 10 observée dans la présente étude. Il s'agit de la théorie de la *surveillance* postrécupération ou « *postretrieval monitoring* ». La surveillance postrécupération consiste dans la mobilisation des processus cognitifs engagés pour évaluer (Allan *et al.*, 2000), vérifier (Moscovitch et McAndrews, 2002) et confirmer (Henson *et al.*, 2002) la validité de l'information récupérée en mémoire épisodique. Cette surveillance a lieu juste avant une décision, qui consiste souvent dans la littérature à fournir une réponse en appuyant sur un bouton (Gilboa, 2004; Rugg *et al.*, 2003; Stevens et Grady, 2007). Cette théorie est particulièrement bien documentée et repose sur plusieurs corpus d'études neuroscientifiques.

Un premier corpus d'études a comparé (1) la tâche de jugement de reconnaissance traditionnelle à une seule épithète (c.-à-d. : correct = vieil item; incorrect = nouvel item) à (2) une tâche de jugement de reconnaissance à deux épithètes. Un jugement de reconnaissance à deux épithètes consiste à devoir identifier comme étant corrects les items qui sont non seulement vieux, mais qui possèdent en plus une seconde épithète (c.-à-d. : correct = vieil item possédant une seconde épithète; incorrect = nouvel item, ou vieil item ne possédant pas cette seconde épithète). Un exemple fréquent de seconde épithète est la localisation spatiale de l'item à l'écran lors de la phase d'encodage. Dans certaines études, les participants avaient par exemple à caractériser comme étant corrects les items qui étaient à la fois vieux et qui avaient été présentés lors de la phase d'encodage au-dessus plutôt qu'en dessous de la ligne du milieu de l'écran (Henson *et al.*, 1999) ou sur le côté gauche de l'écran plutôt que sur le côté droit (Rugg *et al.*, 2003; Simons, Owen, Fletcher et Burgess, 2003).

Dans une variation de la tâche de jugement de reconnaissance à deux épithètes faisant appel à la taille, les participants avaient à qualifier de corrects les vieux items qui étaient plus grands à l'écran lors de la phase de récupération, par rapport à leur taille perçue lors de la phase d'encodage (p. ex. : Ranganath, Johnson et D'Esposito, 2000). Dans une autre variation faisant appel à la séquence temporelle, les participants avaient à qualifier de correct, parmi deux items présentés, celui qui était vieux et qui avait en plus été présenté le plus récemment lors de la phase d'encodage (Dobbins, Simons et Schacter, 2004; Henson *et al.*, 2002). À travers ces études, une activation plus grande de la BA 10 a été observée pour les jugements de reconnaissance à deux épithètes, et cette activation a été attribuée aux demandes de *surveillance* plus élevées requises par ces jugements.

Or, la tâche que devaient exécuter les novices lors de la présente étude présente des similarités avec la tâche de jugement à deux épithètes. En effet, bien que la consigne reçue n'eût exigé des novices que de qualifier de corrects ou d'incorrects les stimuli présentés et donc d'exécuter ce qui s'apparente à un jugement de reconnaissance traditionnel à une seule épithète, il semble plus plausible que les novices aient tout de même considéré une épithète liée à la localisation spatiale lors du posttest. En effet, les novices se trouvaient devant des stimuli relativement complexes et différents entre eux, consistant en des ampoules et fils placés différemment à l'écran d'un circuit à l'autre. Par conséquent, les novices ont probablement dû tenir compte au posttest de ces différences dans la localisation spatiale des éléments des circuits pour juger si un circuit présenté était correct ou incorrect. Cette hypothèse semble de plus appuyée par une étude récente, qui a démontré que 25 % de la variance au score d'un test conceptuel portant sur les circuits électriques pouvait s'expliquer par la variance au score d'un test portant sur les habiletés de visualisation spatiale (Duffy, Sorby et Bowe, 2016).

Un autre corpus d'études s'est plutôt servi de pièges (c.-à-d. : stimuli similaires) afin de créer des demandes de *surveillance* plus grandes. Par exemple, Cabeza *et al.* (2001) ont utilisé une tâche de jugement de reconnaissance de mots consistant en des mots préalablement étudiés lors d'une phase d'encodage (« True »), de mots nouveaux similaires en apparence (« False ») et de mots nouveaux non similaires en apparence (« New »). L'activité cérébrale des participants a été comparée lors de (1) l'évaluation combinée des mots « True » + « False », par rapport à (2) l'évaluation des mots « New ». Une activation plus grande de la BA 10 a été observée dans la première condition, et cette activation a été attribuée à un besoin de *surveillance* accru dû à la présence de pièges. Similairement, Velanova *et al.* (2003) ont utilisé une tâche de reconnaissance de mots. Dans une condition se trouvaient des mots préalablement étudiés une seule fois lors de la phase d'encodage (condition « High control »), tandis que dans la deuxième condition se trouvaient des mots étudiés plusieurs fois et donc surappris (condition « Low control »). Dans les deux conditions, des mots similaires (pièges) étaient intercalés. Une activation plus grande de la BA 10 a été observée pour la condition « High control », et il a été conclu que les participants devaient mobiliser davantage le processus de *surveillance* pour répondre correctement dans cette condition. Or, dans la présente étude, les stimuli représentant des circuits électriques étaient effectivement similaires les uns aux autres et peuvent être considérés comme des pièges les uns par rapport aux autres. La théorie de la *surveillance* à cause de la présence de pièges semble donc plausible pour expliquer, dans le cas de la présente étude, l'activation observée des BA 10.

Une preuve supplémentaire en faveur de la théorie de la *surveillance* post-récupération lorsque des pièges sont en jeu ressort également de la méta-synthèse de Gilboa (2004). Cette méta-synthèse a comparé les régions cérébrales activées par (1) des tâches de jugements de reconnaissance impliquant des stimuli de laboratoire (p. ex. : mots, phrases, images), donc une récupération « artificielle » vs (2) des tâches nécessitant une récupération en mémoire épisodique d'événements réels de la vie des

participants, donc une récupération « authentique ». Quatorze études empiriques primaires ont été incluses dans chaque condition pour la comparaison. L'auteur a observé, à travers cette comparaison, que la récupération « artificielle » provoquait une activation plus grande notamment dans la BA 10 et a conclu que cette activation était due à des demandes de *surveillance* postrécupération accrues. Ces demandes de surveillance accrues ont été attribuées (Gilboa, 2004; King *et al.*, 2005) au fait que les stimuli de laboratoire partagent un contexte très similaire, dépourvu de toute saillance émotionnelle pour les participants (p. ex. : images sur un fond d'écran noir), et que ces stimuli agissent par conséquent comme des pièges entre eux. Par conséquent, les représentations mentales de ces stimuli interféreraient (Henson *et al.*, 2002) et compétitionneraient (Sohn *et al.*, 2003) entre elles durant la tâche de récupération, nécessitant ainsi davantage de *surveillance* postrécupération. Or, les liens entre ces conclusions de la littérature et la présente étude sont évidents. En effet, les circuits électriques présentés étaient des stimuli « artificiels », présentés sous la forme de lignes blanches sur un fond d'écran noir et n'ayant probablement aucune saillance émotionnelle pour les participants. Par conséquent, les différencier afin de fournir une réponse correcte a vraisemblablement été exigeant pour les processus cognitifs de récupération en mémoire épisodique des participants, nécessitant ainsi davantage de *surveillance*.

Un autre corpus d'études appuyant la théorie de la *surveillance* postrécupération provient d'études ayant mesuré la séquence temporelle de l'activation de la BA 10 durant une tâche de récupération en mémoire épisodique (Nelson *et al.*, 2010). Ainsi, plusieurs études utilisant l'IRMf (p. ex. : Henson, Rugg et Shallice, 2000; Reynolds, McDermott et Braver, 2006) et le PET (Schacter *et al.*, 1997) ont observé un début tardif de la réponse hémodynamique dans la région de la BA 10 durant les essais liés à la récupération en mémoire épisodique. Ces résultats ont par ailleurs été triangulés par des études utilisant l'EEG (p. ex. : Rugg et Allan, 2000), une technique plus précise temporellement que l'IRMf. Donc, ces études suggèrent que l'activation de la

BA 10 se produit tardivement lors d'un essai de récupération en mémoire épisodique, ce qui va à l'encontre des théories en rapport avec la prérécupération, et supporte plutôt la théorie de la *surveillance* postrécupération.

Enfin, un dernier corpus d'études soutenant la théorie de la *surveillance* est constitué de méta-synthèses portant sur les fonctions cognitives remplies par les régions préfrontales du cortex humain. Ces méta-synthèses ont conclu que la BA 10 était engagée dans un processus de *méta-surveillance* lors de la récupération en mémoire épisodique (Petrides, 2005; Fletcher et Henson, 2001; Zysset, Huber, Frestl et Cramon, 2002). Ces méta-synthèses accordent ainsi un rôle de niveau cognitif encore plus élevé à la BA 10 que la théorie de la *surveillance*. La théorie de la *méta-surveillance* s'appuie notamment sur le fait que la BA 10 a des interconnexions fonctionnelles avec plusieurs régions cérébrales impliquées dans la récupération en mémoire épisodique, comme des aires dans les lobules pariétaux inférieurs (Moscovitch *et al.*, 2005; Petrides, 2005). La BA 10 agirait ainsi comme un « chef d'orchestre » en surveillant ces autres régions cérébrales lors de l'accomplissement de la tâche de récupération. Une méta-analyse (Duncan et Owen, 2000), portant toujours sur les fonctions cognitives des diverses régions préfrontales, soutient aussi cette théorie de *méta-surveillance* en concluant que la BA 10 est spécifiquement activée par des tâches de récupération en mémoire épisodique qui sont plus exigeantes cognitivement. L'activation de la BA 10 ne surviendrait donc que lorsque des demandes de *méta-surveillance* accrues seraient nécessaires.

En outre, comme de telles tâches plus complexes nécessitent des allers-retours fréquents entre processus cognitifs de prérécupération (chercher une information dans la mémoire) et postrécupération (valider l'information récupérée), la BA 10 a été postulée par d'autres auteurs, dans un sens similaire au paragraphe précédent, comme sous-tendant un *méta-processus* cognitif de haut niveau impliqué dans la récupération (Burgess, Gilbert et Dumontheil, 2007). Ce méta-processus coordonnerait et

superviserait les passages entre processus de prérécupération et postrécupération (Fletcher et Henson, 2001), en plus de jouer le rôle décisionnel au moment de déterminer la meilleure réponse à fournir parmi les informations récupérées en mémoire (Koriat et Goldsmith, 1996). Enfin, dans un sens toujours similaire, Burgess *et al.* (2005, 2006, 2007) attribuent un rôle de « gardien superviseur » ou « supervisory attentional gateway (SAG) » à la BA 10 dans les tâches complexes et exigeantes de récupération en mémoire épisodique lors desquelles plusieurs réponses, ou « schemata » selon les auteurs, sont récupérées simultanément. Or, encore une fois, des liens évidents peuvent être tracés entre cette théorie de *méta-surveillance* et la présente étude. Pour répondre correctement aux stimuli à évaluer au posttest, il a déjà été conclu que les participants n'activaient pas le mécanisme de contrôle inhibiteur. Toutefois, parmi les représentations ou informations récupérées dans leur mémoire lors de l'évaluation des stimuli au posttest, il est bien plausible que les représentations associant l'épithète « correct » aux stimuli naïfs et « incorrect » aux stimuli scientifiques ressurgissaient. En effet, cela est plausible puisque c'est en conformité avec ces représentations que les novices répondaient lors du prétest ayant eu lieu seulement quelques minutes auparavant. Par conséquent, bien que ces représentations incorrectes n'aient pas eu besoin d'être inhibées, elles auraient tout de même pu être récupérées pendant le posttest et il est possible que le rôle de « gardien superviseur » de la BA 10 ait pu servir à faire prévaloir les représentations correctes encodées par les participants lors de la phase de présentation des réponses scientifiquement correctes.

5.2.2.2 Théories concernant l'activation du gyrus angulaire gauche/lobule pariétal inférieur gauche (BA 39/40)

Une activation bilatérale significative dans les gyri angulaires/lobules pariétaux inférieurs (BA 39/40) a été observée dans la présente étude lorsque les novices évaluaient des stimuli naïfs au posttest, comparativement au prétest. Similairement,

une activation dans le gyrus angulaire gauche a de plus été observée pour les stimuli de contrôle. Il convient de rappeler que, pour les tâches de récupération en mémoire épisodique, la région du gyrus angulaire gauche (GAG) est la plus fortement associée par plusieurs méta-analyses à une récupération en mémoire épisodique réussie (p. ex. : Ciaramelli *et al.*, 2008; Kim, 2010; Spaniol *et al.*, 2009; Vilberg et Rugg, 2008). Par conséquent, le reste de la présente section se concentrera sur le GAG/lobule pariétal inférieur gauche.

Plus précisément, une théorie bien documentée concernant le processus cognitif exact joué par cette région dans la récupération en mémoire épisodique est celle de *recollection* épisodique (Cabeza *et al.*, 2008; Ciaramelli *et al.*, 2008, 2010). La *recollection* épisodique réfère à une récupération en mémoire qualitative du contenu d'un événement vécu dans le passé (p. ex. : items présentés lors d'une phase d'encodage) et elle repose sur la récupération d'informations contextuelles spécifiques liées à cet événement. Ainsi, dans une *recollection* épisodique, pour pouvoir se souvenir du contenu d'un événement passé, le participant doit se souvenir aussi d'informations contextuelles comme, par exemple, les détails spatiaux ou temporels liés à l'événement, ou bien encore les émotions qui l'habitaient lorsqu'il a vécu cet événement.

Dans la littérature neuroscientifique, la *recollection* se distingue de la *familiarité*, qui réfère au simple sentiment qu'un événement présenté au participant (p. ex. : items préalablement étudiés) est ancien, sans aucune récupération d'informations contextuelles (Atkinson et Juola, 1973; Cabeza, 2008; Ciaramelli *et al.*, 2008, 2010; Daselaar, Fleck et Cabeza, 2006; Dudukovic et Knowlton, 2006; Moscovitch *et al.*, 2005; Simons *et al.*, 2003; Yonelinas, 2002; Yonelinas, Otten, Shaw et Rugg, 2005). La familiarité est plutôt associée à l'activation du lobule pariétal *supérieur* gauche. Subjectivement, la *recollection* peut ainsi se décrire comme le sentiment de se souvenir de quelque chose (« remember »), tandis que la familiarité peut se décrire

comme le sentiment de simplement savoir quelque chose (« just know ») (Henson *et al.*, 1999b; Wheeler et Buckner, 2004). C'est notamment en comparant les activations cérébrales pour ces deux conditions (*Remember* > *Just know*) à travers un grand corpus d'études empiriques primaires que certaines des méta-analyses citées ci-dessus (Cabeza *et al.*, 2008; Ciaramelli *et al.*, 2008, 2010) sont parvenues à la conclusion que le GAG est impliqué dans la *recollection* épisodique.

Dans les études primaires incluses dans ces méta-analyses, les participants avaient à rapporter si un item récupéré correctement lors d'une tâche de jugement de reconnaissance était accompagné (« Remember ») ou non (« Just knowing ») d'informations contextuelles, comme l'apparence de l'item à l'écran ou le bouton sur lequel ils avaient appuyé lors de l'encodage de l'item (p. ex. : Daselaar *et al.*, 2006; Henson *et al.*, 1999; Henson *et al.*, 2000; Wheeler et Buckner, 2004; Yonelinas *et al.*, 2005; Simons, Henson, Gilbert et Fletcher, 2008; Vilberg et Rugg, 2007, 2012). Des activations plus grandes des gyri angulaires, principalement du gauche, ont été observées à travers ces études pour la condition « Remember », et ces activations étaient fréquemment accompagnées d'activations dans les BA 10.

Au regard de ce corpus d'études et des méta-analyses les ayant examinées, il semble donc tout à fait plausible d'inférer qu'au posttest de la présente étude, les novices aient pu mobiliser ce processus de *recollection* et donc récupérer des informations contextuelles concernant un événement préalable qu'ils ont vécu. L'exemple le plus plausible d'événement préalable, en l'occurrence, est la courte intervention ayant consisté à présenter les réponses scientifiquement correctes aux novices. Ainsi, au posttest, pour répondre correctement, les novices ont très bien pu se souvenir d'informations contextuelles, comme la couleur des mentions « Correct » et « Incorrect » ou bien encore l'emplacement de ces mentions à l'écran, en dessous des circuits électriques. Il est aussi plausible que les novices se soient souvenus, au posttest, de l'émotion de surprise qu'ils ont vécue, lors de la présentation des

réponses scientifiquement correctes, puisque ces réponses étaient contraires à leur conception alternative.

Une telle inférence semble également en conformité avec un autre corpus de littérature, qui postule que l'apprentissage d'associations nouvelles, comme la valeur de vérité de stimuli de laboratoire, est soutenu par le processus de *recollection* (Caza *et al.*, 2004; Yonelinas, 1997, 1999, 2002; Yonelinas, Kroll, Dobbins et Soltani, 1999). Moscovitch *et al.* (2005, 2014) soulignent que le savoir conceptuel que possède un individu sur le monde est d'abord acquis dans le contexte d'un événement spécifique (p. ex. : enseignement magistral en salle de classe), mais que ce savoir conceptuel est graduellement séparé de l'information contextuelle avec laquelle il a été encodé initialement. Selon ces auteurs, ce sont l'expérience et un grand nombre de récupérations en mémoire du concept qui font en sorte que le savoir conceptuel se détache petit à petit des informations contextuelles dans la mémoire du participant. Ceci amène progressivement à une *sémantisation* du concept, soit une trace en mémoire de plus en plus consolidée du savoir en lien avec ce concept. Le savoir conceptuel peut alors être récupéré indépendamment des détails contextuels ayant initialement servi à l'encoder, et donc indépendamment du gyrus angulaire gauche.

Or, dans la présente étude, il est très vraisemblable que la trace du concept scientifique de circuit électrique qu'ont pu encoder les novices dans leur mémoire n'a été, au mieux, que faible et donc peu ou même pas du tout *sémantisée*. En effet, cette trace n'a été créée qu'en leur présentant simplement les réponses scientifiquement correctes avant le posttest, sans aucun enseignement plus détaillé. De plus, les novices n'avaient pas suivi de cours de sciences depuis plusieurs années, ce qui soutient aussi l'hypothèse d'une trace au mieux minimaliste dans leur mémoire du concept scientifique de circuit électrique. Au posttest, les novices ont donc vraisemblablement réalisé une récupération de cette trace, qui était toutefois accompagnée d'informations liées au contexte de présentation des réponses correctes,

expliquant ainsi l'activation du gyrus angulaire gauche. Cette trace se serait probablement effacée de la mémoire des novices avec l'écoulement du temps et n'aurait probablement pas donné lieu à un taux d'exactitude bien élevé lors d'un éventuel posttest déferé, quelques mois plus tard, si un tel posttest avait été administré.

Il est à noter que, comme pour la BA 10, d'autres théories très similaires à celle de la *recollection* sont documentées dans la littérature scientifique concernant le rôle joué par le GAG dans la récupération en mémoire épisodique. L'une de ces théories postule que le GAG est un *accumulateur mnémonique* ou « mnemonic accumulator » (Cabeza, 2008; Cabeza *et al.*, 2008; Ciaramelli *et al.*, 2008; Wagner, Shannon, Kahn et Buckner, 2005). Selon cette théorie, le GAG ne contribuerait pas à se souvenir de traces emmagasinées en mémoire, mais servirait plutôt à intégrer des informations internes provenant de différentes régions cérébrales et à résumer ces informations en leur attribuant un signal appelé « memory-strength signal ». Selon la force de ce signal, soit si elle se trouve au-dessus ou en dessous d'un seuil, une décision est prise et une réponse est fournie par le participant (p. ex. : correct = vieil item; incorrect = nouvel item).

Cette théorie repose notamment sur des études (Kahn, Davachi et Wagner, 2004; Wheeler et Buckner, 2003) ayant observé une activation du GAG qui était plus importante de façon proportionnelle à la perception du participant d'avoir déjà étudié des stimuli présentés lors d'une tâche de jugement de reconnaissance (c.-à-d. : perception d'ancienneté ou « oldness perception »). En d'autres termes, dans ces études, plus le participant avait le sentiment d'avoir étudié les stimuli présentés lors de la phase d'encodage, plus le GAG s'activait. Cette théorie postule donc que le GAG jouerait un rôle décisionnel de haut niveau dans la récupération en mémoire épisodique et que cette région ne serait pas nécessairement subordonnée aux régions préfrontales. Or, dans la présente étude, il n'est pas exclu que cette théorie puisse

expliquer l'activation du GAG au posttest, les novices ayant observé à l'écran les stimuli à plusieurs reprises autant dans la phase du prétest que lors de l'intervention. Une perception d'ancienneté a donc pu se développer quant à ces stimuli. Toutefois, cette théorie ne semble néanmoins pas pouvoir expliquer de façon satisfaisante l'activation du GAG, car elle postule un rôle de haut niveau pour le GAG, rôle quasi indépendant des régions préfrontales. Or, dans la présente étude, des activations bilatérales très significatives des régions rostrofrontales (BA 10) ont été observées lors de l'évaluation des stimuli naïfs au posttest comparativement au prétest, rendant ainsi le pouvoir explicatif de cette théorie somme toute limité.

Une autre théorie, appelée la focalisation de l'*attention vers des représentations internes* ou « attention to internal representations » postule que le GAG déplace et maintient l'attention sur les représentations internes emmagasinées dans la mémoire épisodique des participants (Cabeza, 2008; Cabeza *et al.*, 2008; Ciaramelli *et al.*, 2008; Wagner *et al.*, 2005). Selon cette théorie, une *recollection* épisodique serait ainsi plutôt un processus nécessitant un désengagement des ressources attentionnelles du participant de son environnement externe et une réallocation de ces ressources vers les représentations internes pertinentes à la tâche de récupération en mémoire (Vilberg et Rugg, 2008, 2012). L'appui empirique le plus fort en faveur de cette théorie est apporté par des études dans lesquelles il était explicitement demandé aux participants de se souvenir de détails précis d'un événement vécu dans leur passé (p. ex. : Wagner *et al.*, 2005). Ces études observaient alors une activation plus grande du GAG, par rapport à diverses conditions de contrôle comme la fixation visuelle. Or, cette théorie ne semble pas pouvoir expliquer plausiblement l'activation du GAG dans la présente étude. En effet, bien que les novices devaient forcément allouer une partie de leurs ressources attentionnelles à leurs représentations internes (c.-à-d. : représentations des réponses scientifiquement correctes qui leur avaient été présentées), la tâche consistait à évaluer des stimuli externes qui leur étaient présentés sur un écran et qui se succédaient assez rapidement. Les novices devaient donc

vraisemblablement allouer une partie considérable de leurs ressources attentionnelles à ces stimuli et ne pouvaient donc vraisemblablement pas se désengager de leur environnement externe.

Une théorie sensiblement différente a été proposée par certains auteurs, notamment par O'Connor, Han et Dobbins (2010), soit la théorie de la *violation des attentes de la mémoire* ou « violation of memory expectations ». Ces auteurs ont observé, dans une étude portant sur une tâche classique de jugement de reconnaissance, que l'activation du GAG était sensible à l'incongruence ou à la non-correspondance entre (1) un indice présenté en vue du prochain item dans la tâche de récupération ou « anticipatory clue » et (2) un item présenté à l'écran immédiatement après cet indice qui allait à l'encontre de l'indice. Ces indices consistaient en de courts descripteurs (p. ex. : « Likely old » or « Unlikely old ») concernant le statut correct (Old) ou incorrect (New) de l'item à venir, et il y avait violation des attentes lorsque l'item contredisait le descripteur. Les auteurs ont par conséquent conclu que l'activation plus grande du GAG observée dans la récupération en mémoire épisodique semblait être un marqueur de violation des attentes de la mémoire, plutôt qu'une *recollection*. Or, dans la présente étude, la présentation des stimuli prenait la forme de courts films, lors desquels un circuit paraissait tout d'abord à l'écran sans batterie, pour être ensuite complété 1,5 s plus tard par l'apparition d'une batterie et d'ampoules dont certaines s'allumaient et d'autres pas. Toutefois, il est difficile de considérer la première partie de ces films comme étant une forme d'indice, car elle n'informait en rien les participants du type de circuit qui allait apparaître à l'écran 1,5 s plus tard. Donc, cette théorie ne semble pas pouvoir expliquer plausiblement l'activation du GAG observée dans la présente étude.

Enfin, d'autres théories plus ou moins similaires existent dans la littérature neuroscientifique quant au processus cognitif précis joué par le GAG dans la récupération en mémoire épisodique. Elles seront très brièvement abordées ici.

D'abord, dû à son rôle très bien documenté comme tampon phonémique dans les processus liés au langage (Seghier, 2013; Seghier *et al.*, 2010), le GAG a été postulé comme jouant le rôle de *tampon mnémorique* dans le processus de récupération en mémoire épisodique. Selon cette théorie, le GAG retiendrait ainsi temporairement les produits de la récupération sous la forme d'une représentation mentale accessible aux processus décisionnels de plus haut niveau joués par les régions préfrontales, comme la BA 10 (Baddeley, 2000; Cabeza, 2008; Cabeza *et al.*, 2008; Rugg et Vilberg, 2013; Wagner *et al.*, 2005). Une théorie semblable (Shimamura, 2011) postule d'ailleurs que le GAG agirait comme une *zone de convergence* reliant entre elles diverses informations contextuelles encodées de façon éparpillée dans différentes régions du cerveau. Selon cette théorie, le GAG serait « idéalement situé pour accomplir ce processus, car il est à la jonction des cortex pariétal, temporal et occipital » (Critchley, 1966, p. 197, cité dans Meurant, 2012). Une autre théorie semblable est dérivée des études ayant porté sur le rôle du GAG dans les processus d'allocation des *ressources attentionnelles* en fonction des objectifs et des stimuli impliqués dans la tâche de récupération (Corbetta *et al.*, 2000, 2005; Corbetta, Patel et Shulman 2008; Corbetta et Shulman, 2002; Yantis, 2000). Selon cette théorie, le GAG serait impliqué dans des processus attentionnels allant du bas vers le haut ou « bottom-up attentional process » lors d'une récupération en mémoire épisodique, processus qui consistent à focaliser l'attention afin de déceler (1) les stimuli externes pertinents pour accomplir la tâche et également (2) les traces ou représentations internes pertinentes ayant été préalablement encodées en mémoire épisodique (Cabeza, 2008; Cabeza *et al.*, 2008; Ciaramelli *et al.*, 2008; Rugg et Vilberg, 2013). Un point commun de ces trois théories est à l'effet que le GAG jouerait un rôle subordonné aux régions préfrontales et aux régions pariétales supérieures lors de la récupération en mémoire épisodique. Il est donc plausible qu'elles puissent expliquer l'activation du GAG observée dans la présente étude, compte tenu des activations très significatives des BA 10 et des régions pariétales supérieures (BA 7/23/31) observées ici. En outre, ces trois théories concordent avec le corpus d'études empiriques et avec les méta-

analyses (p. ex. : Kim, 2010; Spaniol *et al.*, 2009) ayant observé des coactivations des régions rostrofrontales et du GAG lors des tâches de récupération en mémoire épisodique.

5.2.2.3 Théories concernant l'activation du précunéus/cortex cingulaire postérieur (BA 7/23/31)

Certains auteurs précisent que les régions du précunéus et du cortex cingulaire postérieur peuvent être considérées comme un tout dans la récupération en mémoire épisodique, puisqu'elles accomplissent des fonctions similaires dans le processus de récupération épisodique (p. ex. : Cabeza, 2008; Cabeza *et al.*, 2008). Par souci de simplicité et de concision, ces deux régions seront donc discutées ensemble dans la présente section sous la dénomination de lobule pariétal supérieur médian (LPSm) ou de BA 7/23/31. Malgré le fait qu'elles soient considérées ensemble ici à des fins de concision, il faut souligner que ces régions sont séparées anatomiquement et physiologiquement et ne forment pas un tout homogène. En effet, le précunéus est une partie du lobule pariétal supérieur, alors que le cortex cingulaire postérieur est une partie du cortex rétrospécial (Cabeza, 2008; Cabeza *et al.*, 2008; Leech, Braga et Sharp, 2012).

Une théorie bien documentée dans la littérature à l'égard du rôle des BA 7/23/31 dans la récupération en mémoire épisodique est celle de l'*imagerie mentale*, qui peut se définir comme la création d'images ou de représentations internes dans la cognition d'un participant afin de soutenir le processus de récupération (Cavanna et Trimble, 2006; Leech et Sharp, 2014). Cette théorie repose notamment sur des études (p. ex. : Fletcher *et al.*, 1995, 1996; Grasby *et al.*, 1993a, 1993b; Halsband *et al.*, 1998; Shallice *et al.*, 1994) qui ont comparé les activations cérébrales sous-tendant la récupération en mémoire épisodique d'(1) items imaginables ou concrets vs (2) des items non imaginables ou abstraits. Un exemple (Fletcher *et al.*, 1995) d'items

imaginables est une paire de mots dénommant des objets concrets, comme « River-Stream », alors qu'un exemple d'items non imaginables est une paire de mots dénommant des entités abstraites, comme « Justice-Law ». Une activation plus grande du lobule pariétal supérieur médian était observée pour les items imaginables.

Or, cette théorie semble a priori pouvoir expliquer plausiblement l'activation des BA 7/23/31 observée dans la présente étude. Bien que le savoir conceptuel sous-tendant une compréhension scientifique des circuits électriques implique des concepts abstraits et pas aisément imaginables (Mikropoulos et Natsis, 2011; Taber, 2006), comme le flux d'électrons dans les fils, il est peu probable que les novices de la présente étude aient eu recours à de tels concepts. En effet, aucun enseignement portant sur ces concepts ne leur a été prodigué lors de l'intervention. Ils ont plutôt été assujettis, lors de l'intervention, à des images représentant les réponses scientifiquement correctes. Il est par conséquent bien plausible qu'ils aient simplement emmagasiné ces images « correctes » sous la forme de représentations internes dans leur cognition, ce qui explique l'activation observée du LPSm. En revanche, ce qui rend le pouvoir explicatif de cette théorie moins grand dans le cas présent est le fait que plusieurs études empiriques ont observé le résultat contraire des études citées plus tôt dans ce paragraphe, à savoir une activation du LPSm plus grande lors de la récupération d'items non imaginables, comme des paires de mots abstraits (Krause *et al.*, 1999; Schmidt *et al.*, 2002) ou des mélodies (Platel *et al.*, 2003).

Une théorie différente postule plutôt que l'activation du LPSm survenant durant la récupération en mémoire épisodique est associée à une *récupération réussie* ou « successful retrieval » (Kapur *et al.*, 1995; Krause *et al.*, 1999; Nyberg, 1999; Naghavi et Nyberg, 2005). Il s'agit donc de la même théorie que celle déjà discutée plus tôt concernant la BA 10. Il convient de rappeler que cette théorie repose principalement sur des études qui ont varié la performance des participants lors de la

récupération. Par exemple, Kapur *et al.* (1995) ont utilisé une tâche classique de jugement de reconnaissance sur des mots et comparé l'activité cérébrale dans (1) une condition à haut taux de réussite, où 85 % des mots avaient préalablement été étudiés dans la phase d'encodage vs (2) une condition à faible taux de réussite, où seulement 15 % des mots avaient préalablement été étudiés dans la phase d'encodage. Une activation plus grande du LPSm était alors observée dans la condition à haut taux de réussite.

Tel que déjà argumenté précédemment, cette théorie ne semble pas pouvoir expliquer le plus plausiblement l'activation des BA 10 observée dans la présente étude. Comparativement au prétest, les BA 10 étaient en effet activées lors de l'évaluation des stimuli naïfs au posttest, mais non lors de l'évaluation des stimuli scientifiques, malgré un taux de réussite élevé et similaire observé pour ces deux conditions. Toutefois, concernant l'application de cette théorie au cas du LPSm, cette région est davantage activée au posttest, comparativement au prétest, autant lors de l'évaluation de stimuli naïfs que scientifiques. Donc, la théorie de la *récupération réussie* pourrait trouver application pour expliquer cette activation. En effet, au prétest, les novices présentaient un très faible taux de réussite, voire nul, autant pour les stimuli naïfs que scientifiques et il est plausible d'inférer qu'ils ne récupéraient vraisemblablement rien en mémoire. Au posttest, au contraire, ils présentaient un haut taux de réussite pour ces deux types de stimuli et il est plausible d'inférer que, comparativement au prétest, cela était donc dû à une *récupération réussie* sous-tendue par l'activation du LPSm autant pour les stimuli naïfs que scientifiques.

Une autre théorie (Cavanna et Trimble, 2006; Richter, Cooper, Bays et Simons, 2016) postule plutôt que le rôle du LPSm dans la récupération épisodique serait en fait le même que celui attribué au gyrus angulaire gauche/lobule pariétal inférieur gauche, à savoir une *recollection*. Cette théorie s'appuie notamment sur les études, tel que déjà expliqué, qui ont comparé l'activité cérébrale de participants dans les conditions

« Remember » vs « Just know » et ont observé une plus grande activation du LPSm dans la première condition (p. ex. : Henson *et al.*, 1999; Trinkler *et al.*, 2009). Un autre corpus d'études soutenant cette théorie a consisté à comparer (1) l'activité cérébrale de participants dans diverses conditions de contrôle, comme la fixation visuelle d'items à (2) leur activité cérébrale lorsqu'ils avaient à performer des jugements de source concernant les informations contextuelles dans lesquelles un item avait été préalablement encodé. Des exemples de conditions correspondant à ces jugements de sources ont consisté à déterminer la localisation spatiale de l'item à l'écran (Frings *et al.*, 2006; Hirshhorn *et al.*, 2012; Schedlbauer, Copara, Watrous et Ekstrom, 2014), l'ordre de l'item dans la séquence temporelle de présentation (Hirshhorn *et al.*, 2012; Schedlbauer *et al.*, 2014), l'item accompagnant cet item lors de l'encodage (Lundstrom *et al.*, 2003; Lundstrom, Ingvar et Petersson, 2005), ou bien la couleur de l'item lors de l'encodage (Bonni *et al.*, 2015). Une activation plus grande du LPSm était observée, par ces études, lors du jugement de source comparativement aux diverses conditions de contrôle. Ainsi, dans la présente étude, étant donné qu'une activation du LPSm est observée autant lors de l'évaluation des stimuli naïfs que scientifiques au posttest, cette théorie pourrait plausiblement expliquer cette activation. Tel que déjà discuté préalablement, il n'était pas demandé aux novices de la présente étude d'exécuter un jugement de source. Cependant, les novices ont tout de même pu plausiblement activer leur LPSm afin de se souvenir, au posttest, de détails contextuels encodés préalablement, par exemple la couleur ou l'emplacement des mentions *Correct* et *Incorrect* lors de la phase de présentation des réponses scientifiquement correctes.

Enfin, une dernière théorie particulièrement bien documentée dans la littérature neuroscientifique concernant le rôle du LPSm dans la récupération épisodique est fortement dérivée de la théorie neurocognitiviste d'allocation des ressources attentionnelles en fonction du but et des stimuli impliqués dans la tâche ou « goal-directed and stimulus-driven attention ». Cette théorie a été postulée par Corbetta *et*

al. (2002, 2005, 2008) et reprise par des auteurs s'intéressant spécifiquement à la mémoire épisodique (p. ex. : Cabeza, 2008; Cabeza *et al.*, 2008; Ciaramelli *et al.*, 2008, 2010). Cette théorie postule que l'activation du LPSm durant une récupération épisodique est associée à une *allocation de ressources attentionnelles descendantes* ou « top-down attentional resources » (Cabeza, 2008; Cabeza *et al.*, 2008; Ciaramelli *et al.*, 2008, 2010; Rajah et McIntosh, 2015). Les ressources attentionnelles descendantes, dans le contexte d'une récupération épisodique, consistent à (1) générer et à maintenir dans la pensée le but de la tâche en cours ainsi que les représentations internes pertinentes préalablement encodées dans la mémoire épisodique et à (2) les appliquer afin de traiter et sélectionner les stimuli externes présentés durant la tâche de récupération pour arriver à une réponse correcte (Ciaramelli *et al.*, 2008, 2010; Corbetta *et al.*, 2002, 2005, 2008). En d'autres termes, les ressources attentionnelles descendantes sont une forme de processus cognitif d'assez haut niveau responsable de l'allocation des ressources attentionnelles afin de soutenir la prérécupération et la postrécupération épisodiques. Au regard de cette théorie, les tâches de récupération épisodique plus exigeantes cognitivement, qui requièrent davantage de recherche en mémoire épisodique et davantage de *surveillance* ou « monitoring », causent donc une plus grande activation du LPSm que les tâches de récupération moins demandantes cognitivement (Cabeza *et al.*, 2008; Kuhl, Dudukovic, Kahn et Wagner, 2007; Wagner *et al.*, 2005). Cette théorie se base notamment sur des conclusions méta-analytiques (Ciaramelli *et al.*, 2010) qui ont trouvé une plus grande activation du LPSm à travers les études lors des : (1) jugements de reconnaissance pour lesquels les participants exprimaient un bas niveau de confiance dans leurs réponses, comparativement aux jugements où ils exprimaient un haut niveau de confiance; (2) jugements de reconnaissance portant sur des items fréquemment rencontrés dans la vie courante (p. ex. : mots très courants), comparativement aux jugements portant sur des items peu fréquents (p. ex. : mots rares); (3) jugements de reconnaissance dans lesquels des items préalablement étudiés étaient mélangés à des items-pièges, comparativement aux jugements où il n'y avait pas d'items-pièges.

Dans la première comparaison décrite ci-dessus, un bas niveau de confiance est associé à un niveau plus élevé d'incertitude par rapport au caractère correct ou incorrect de la décision découlant de la recherche en mémoire épisodique. Par conséquent, les participants doivent s'engager dans une recherche en mémoire épisodique plus soutenue, incluant une plus grande mobilisation des processus de prérécupération et de postrécupération ainsi que des allers-retours entre ces deux types de processus, ce qui nécessite une plus grande *allocation de ressources attentionnelles descendantes* (Ciaramelli *et al.*, 2008, 2010).

De la même façon, dans la deuxième comparaison décrite ci-dessus, les jugements de reconnaissance portant sur des items fréquents sont associés à un niveau plus élevé d'incertitude, car ces items ont été rencontrés un grand nombre de fois au quotidien. Les ressources attentionnelles descendantes doivent donc être engagées afin de déterminer si ces items ont été ou pas rencontrés dans la liste d'items présentés lors de la phase d'encodage (Chee *et al.*, 2003, 2004; Ciaramelli *et al.*, 2008, 2010).

Similairement, dans la troisième comparaison présentée ci-dessus, puisque les items-pièges ressemblent beaucoup aux items étudiés préalablement dans la phase d'encodage, le rejet de ces items-pièges nécessite un engagement plus grand des ressources attentionnelles descendantes afin de réussir à distinguer ces pièges des items corrects et de parvenir ainsi à un jugement de reconnaissance correct (von Zerssen *et al.*, 2001).

Or, la théorie de l'allocation des ressources attentionnelles descendantes semble pouvoir expliquer plausiblement les activations du LPSm observées dans la présente étude. De un, les auteurs de cette théorie (p. ex. : Cabeza *et al.*, 2008, p. 8) reconnaissent explicitement le rôle des régions préfrontales en écrivant par exemple que « the top-down attention system involves not only the [LPSm] but also [...] frontal regions ». Cette théorie est donc cohérente avec l'activation des BA 10

observée dans la présente étude. De deux, bien que les participants de la présente étude n'aient pas été questionnés quant à leur niveau de confiance envers les réponses fournies au posttest, la troisième comparaison expliquée ci-dessus (présence d'items-pièges vs pas d'items-pièges) semble trouver application. En effet, tel que déjà décrit précédemment, il semble tout à fait plausible que, dû à l'apparence similaire des différents circuits électriques à évaluer lors de la tâche, ceux-ci aient pu agir entre eux à titre de pièges. Conséquemment, il semble vraisemblable qu'un engagement plus important des ressources attentionnelles descendantes ait été nécessaire pour répondre correctement au posttest, d'où l'activation plus grande du LPSm qui a été observée.

5.2.2.4 Théories concernant l'activation du putamen/globus pallidus

Une activation significative bilatérale chevauchant le putamen et le globus pallidus a été observée, dans la présente étude, lors de l'évaluation des stimuli naïfs au posttest. Ces deux régions font partie d'un groupement de régions appelées ganglions basaux, qui sont des régions sous-corticales enfouies profondément dans le cerveau (Heimer, Zahm et Alheid, 1995). Le rôle de ces régions dans la régulation des gestes moteurs et la dysfonction des ganglions basaux impliquée dans certaines dyskinésies, comme la maladie de Parkinson, sont particulièrement bien documentés dans la littérature neuroscientifique (p. ex. : Blandini, Nappi, Tassorelli et Martignoni, 2000; Foerde et Shohamy, 2011).

Toutefois, contrairement aux trois autres groupes de régions discutées jusqu'ici, il semble exister peu ou pas de littérature concernant un éventuel rôle du putamen ou du globus pallidus dans la récupération épisodique. En revanche, une région contiguë et faisant aussi partie des ganglions basaux, soit le noyau caudé, est associée par certaines méta-analyses (p. ex. : Kim, 2010; Spaniol *et al.*, 2009) à la récupération épisodique. Spaniol *et al.* ont calculé, par exemple, des « clusters » de 696 mm³ dans

le noyau caudé gauche et de 576 mm³ dans le noyau caudé droit. Tel qu'il ressort de la taille de ces volumes, ils sont considérablement moins imposants que d'autres exemples de volumes fournis précédemment pour les BA 39/40 ou les BA 7/23/31. Toutefois, aucune des méta-analyses recensées dans le cadre du présent mémoire ne fait état d'un « cluster » activé dans le putamen ou le globus pallidus à travers les études empiriques ayant porté sur une tâche de récupération épisodique.

Par conséquent, l'explication la plus plausible de l'activation du putamen/globus pallidus dans la présente étude semble être une récupération en mémoire procédurale. Celle-ci peut se définir comme la récupération d'informations liées à l'exécution d'une séquence motrice précise impliquée dans des habiletés motrices de haut niveau, comme faire de la bicyclette ou, sur le plan académique, appliquer des correspondances graphophonémiques lors de la lecture (Lum et Conti-Ramsden, 2014; Lum, Ullman et Conti-Ramsden, 2013; Setlow et McGaugh, 1999). L'association du putamen et du globus pallidus à ce type de récupération provient notamment d'études neurobehaviorales ayant porté sur différentes espèces de mammifères, comme les rats, les singes et les humains (Packard et Knowlton, 2002). Ces études ont observé que des lésions soit naturelles, soit provoquées pharmacologiquement, qui compromettaient l'intégrité du putamen et du globus pallidus causaient une incapacité à accomplir différentes habiletés motrices de haut niveau. Par exemple, des rats dont ces régions étaient inhibées pharmacologiquement n'arrivaient plus à se souvenir d'une séquence motrice apprise et maîtrisée au préalable afin de retrouver leur chemin dans un labyrinthe (Setlow et McGaugh, 1999). Dans la même veine, selon certains auteurs, la mémoire procédurale est également responsable de l'apprentissage d'associations complexes stimulus-réponse (Packard et Knowlton, 2002).

En vertu de cette littérature, l'explication la plus plausible quant à l'activation du putamen/globus pallidus lors du posttest de la présente étude serait à l'effet que les

novices récupéraient probablement une séquence motrice qu'ils avaient encodée dans leur mémoire procédurale lors de la phase de présentation des réponses correctes. Cette séquence consistait vraisemblablement à appuyer sur le bouton approprié (réponse) en fonction de la valeur de vérité associée à chaque stimulus présenté à l'écran lors du posttest (stimulus). La récupération en mémoire procédurale, résultant en l'activation du putamen/globus pallidus, semble donc être survenue à la suite de la récupération en mémoire épisodique lorsque les novices répondaient lors du posttest.

5.2.2.5 Interprétation unifiée des activations cérébrales observées

En vertu des quatre sections précédentes, l'interprétation unifiée qui semble la plus plausible pour expliquer les activations cérébrales observées chez les novices au posttest, comparativement au prétest, pourrait vraisemblablement se décliner dans les étapes suivantes lorsque les novices avaient à évaluer les stimuli naïfs.

(1) Le gyrus angulaire gauche/lobule pariétal inférieur gauche (BA 39/40) s'activait afin de réaliser une *recollection* de l'événement récemment vécu par les participants, soit la présentation des réponses scientifiquement correctes. Cela permettait de recréer le souvenir de la réponse correcte en lien avec le stimulus perçu à l'écran.

(2) Compte tenu, entre autres, de l'apparence similaire des stimuli à l'écran et donc du fait qu'ils ont vraisemblablement agi comme des pièges entre eux, un besoin accru d'*allocation de ressources attentionnelles descendantes* s'est manifesté par l'activation du lobule pariétal supérieur médian (BA 7/23/31).

(3) Compte tenu également de cet aspect lié aux pièges, mais aussi compte tenu d'autres facteurs, comme le fait que les stimuli employés étaient des stimuli préalablement étudiés dans un contexte de laboratoire et donc dans un contexte indifférencié manquant de saillance émotionnelle et rendant la *recollection* plus

difficile, un besoin de *surveillance* ou de « monitoring » accru s'est manifesté par une activation du cortex rostronfrontal (BA 10) afin de « surveiller » la récupération effectuée par les régions pariétales.

(4) Enfin, une fois le mécanisme de récupération épisodique complété et la décision quant à la réponse à fournir prise, les participants devaient fournir une réponse en appuyant sur un bouton. Il semble donc plausible qu'ils récupéraient à ce moment, dans leur mémoire procédurale, une séquence motrice préalablement encodée associant la valeur de vérité perçue des stimuli au bouton sur lequel appuyer. Cette récupération procédurale a pu ainsi résulter en l'activation du putamen/globus pallidus.

Concernant les stimuli scientifiques, les activations observées au posttest ne consistent qu'en l'activation du LPSm et n'appuyent donc pas la séquence proposée ci-dessus pour les stimuli naïfs. Il est par conséquent possible que le cerveau des novices ait tout simplement moins réagi à ces stimuli, qui ne sous-tendaient pas leur conception alternative. Cela pourrait s'expliquer par la théorie de l'*énumération inductive* décrite à la section 1.4 du présent mémoire, qui postule que la genèse des conceptions alternatives pourrait s'expliquer par des observations et des expériences personnelles répétées portant sur des phénomènes de son environnement (Carruthers *et al.*, 2002). Ainsi, une observation courante, dans la vie quotidienne, consiste à percevoir un grand nombre d'objets électriques qui semblent être liés à leur source de courant par un seul fil électrique. En réalité, deux fils sont apposés ensemble au sein d'un câble ayant une gaine isolante extérieure, complétant ainsi un circuit électrique. En revanche, pratiquement aucun objet électrique moderne d'usage courant ne contient ces deux fils de façon visiblement séparée. Par conséquent, il est probable que l'évaluation des stimuli naïfs, qui correspondaient à cette observation quotidienne fréquente, ait provoqué des demandes cognitives accrues chez les novices au posttest afin de fournir la réponse correcte. Ces demandes cognitives accrues ont donc pu

résulter dans les activations supplémentaires observées lors de l'évaluation des stimuli naïfs, comme l'activation des BA 10.

5.3 Liens avec des modèles de changement conceptuel et la séquence longitudinale

Dans un premier temps, la présente section discutera des résultats obtenus dans le présent mémoire en rapport avec l'un des débats majeurs ayant lieu présentement entre théoriciens du changement conceptuel, à *savoir* le débat concernant la *séquence longitudinale* optimale à travers laquelle un apprenant doit passer pour réaliser un changement conceptuel. Il convient ici de rappeler que ce débat, déjà abordé à la section 2.2.3 du présent mémoire, peut se résumer à la question à savoir s'il faut : (A) que l'apprenant soit exposé dans un premier temps aux limites du pouvoir explicatif de sa conception alternative pour éprouver ainsi de l'insatisfaction par rapport à celle-ci (ou conflit cognitif), pour ensuite être exposé dans un deuxième temps au concept scientifique de façon à en percevoir le pouvoir explicatif plus performant et l'utilité supérieure ou (B) que l'apprenant soit exposé dans un premier temps au concept scientifique de façon à en percevoir le pouvoir explicatif et l'utilité, pour ensuite être exposé au pouvoir explicatif limité de sa conception. En des termes plus abrégés et tel qu'également décrit à la section 2.2.3, ces deux séquences longitudinales peuvent aussi se résumer, de façon générale, sous la forme inverse suivante (Potvin, 2013) :

(A) conflit cognitif → présentation du concept scientifique

(B) présentation du concept scientifique → conflit cognitif

L'intervention utilisée dans la présente étude, tel que déjà mentionné, consistait à présenter les réponses scientifiquement correctes aux participants, sans aucune explication ou enseignement supplémentaire. Il a été déterminé que cette intervention semble avoir mené à une trace en mémoire épisodique chez les participants, trace

qu'ils ont subséquemment récupérée au posttest afin de fournir des réponses scientifiquement correctes. Un parallèle semble pouvoir conséquemment être fait entre cette intervention et le débat décrit ci-dessus. Tel qu'abordé au chapitre 2, il convient ici de rappeler que les modèles de changement conceptuel dits « classiques » adhéraient généralement à la séquence longitudinale A décrite ci-dessus (p. ex. : Chi, 1992; Nussbaum et Novick, 1982; Posner *et al.*, 1982).

En effet, ces modèles postulaient généralement que, afin de réaliser un changement conceptuel, les apprenants devaient dans un premier temps prendre conscience des limites explicatives et des insuffisances de leur conception alternative. Il était fréquemment recommandé que cela soit réalisé au moyen de l'induction d'un état de conflit cognitif (Posner *et al.*, 1982) ou de dissonance cognitive (She, 2001) chez l'apprenant. Tel que déjà défini à la section 2.2.3 du présent mémoire, cet état de conflit cognitif est un déséquilibre entre la structure cognitive de l'apprenant et des informations ou données observées dans son environnement. L'apprenant n'arrivant pas à expliquer de façon satisfaisante ces informations ou données externes à l'aide de ses conceptions internes, il ressent alors un conflit, une insatisfaction ou un doute. Les modèles classiques suggèrent par exemple d'induire cet état de conflit cognitif à l'aide d'une démonstration où la prédiction de l'apprenant s'avérerait fautive (Klopfer *et al.*, 1983; Posner *et al.*, 1982) ou à l'aide d'autres types de données paraissant comme une anomalie aux yeux de l'apprenant (p. ex. : Chinn et Brewer, 1993). À ce sujet, Chi (2008, p. 66), dont le modèle original date du début des années 1990, s'exprime en ces termes : « For conceptual change to occur, prior knowledge must conflict with new information ». Ce n'est qu'après l'induction d'un conflit cognitif que les modèles classiques recommandent d'exposer l'apprenant au concept scientifique de manière à rendre ce concept plausible, intelligible et fertile dans la structure cognitive de l'apprenant (Posner *et al.*, 1982), créer de nouveaux états mentaux (She, 2001), produire une accommodation cognitive du nouveau concept (Nussbaum et Novick, 1982), catégoriser un concept donné dans une nouvelle

catégorie ontologique (Chi, Slotta et de Leeuw, 1994) ou bien créer de nouveaux modèles mentaux (Clement, 1988; Vosniadou et Brewer, 1994).

Au contraire, certains modèles de changement conceptuel plus récents adhèrent plutôt à la séquence longitudinale B (Ohlsson, 2009, 2013; Potvin, 2013, Potvin *et al.*, 2015; Potvin et Cyr, 2017a, 2017b). De façon générale, ces modèles postulent que, afin qu'un changement conceptuel puisse se produire, le concept scientifique doit dans un premier temps être disponible dans la structure cognitive de l'apprenant et que le pouvoir explicatif ou l'utilité de ce concept soit perçue par l'apprenant. Ce n'est qu'après cette étape que les apprenants peuvent être exposés aux limites ou insuffisances de leur conception alternative et, par un processus de conflit cognitif ou d'évaluation compétitive de la conception et du concept, en arriver à accorder un statut plus prévalent (Potvin, 2013) ou une utilité cognitive plus importante (Ohlsson, 2009) au concept. Certaines preuves empiriques récentes suggèrent, quoique de manière modeste, que la séquence B serait possiblement plus efficace que la séquence A pour que les apprenants réalisent effectivement un changement conceptuel.

En effet, des observations empiriques en ce sens ont eu lieu autant en physique, pour l'apprentissage de concepts contre-intuitifs liés à la flottaison des corps (Potvin *et al.*, 2015), qu'en géométrie, pour l'apprentissage de concepts contre-intuitifs liés à la distinction entre les concepts d'aire et de périmètre (Babai *et al.*, 2016). Par exemple, Potvin *et al.* (2015) ont mesuré l'efficacité comparative des séquences A et B dans l'apprentissage du concept contre-intuitif de masse volumique, impliqué dans la flottaison des corps et pour lequel une conception alternative fréquente consiste à croire que « les objets légers flottent, alors que les objets lourds coulent ». Dans cette étude, des groupes d'élèves ($N = 558$) du troisième cycle du primaire (5^e et 6^e années) ont été assujettis à une intervention consistant soit en la séquence classique A, soit en la séquence B. Leur apprentissage ou gain conceptuel a été mesuré avant et après l'intervention au moyen d'un test conceptuel. Le résultat principal de cette étude a été

à l'effet que les deux séquences ont produit un gain conceptuel très significatif ($p < ,001$) et que la séquence B serait possiblement légèrement plus efficace. La taille d'effet associée au gain conceptuel provoqué par la séquence A était en effet de $d = 0,18$, alors que la taille d'effet associée au gain conceptuel provoqué par la séquence B semblait légèrement supérieure ($d = 0,20$).

Or, bien que la présente étude n'ait pas testé l'efficacité de l'une des deux séquences longitudinales A ou B décrites ci-dessus, il est tout de même possible d'établir certains liens entre les résultats obtenus ici et le débat entourant la séquence longitudinale optimale. Il peut d'abord être avancé, prudemment, que l'intervention utilisée dans la présente étude, soit présenter les réponses scientifiquement correctes, correspond davantage à la séquence longitudinale B plutôt qu'à la séquence longitudinale A. Cette conclusion s'appuie principalement sur deux arguments, l'un de nature plus théorique et l'autre de nature plus empirique. Le premier argument consiste dans les activations cérébrales observées au posttest comparativement au prétest. Tel que décrit en détail dans les sections précédentes du présent mémoire, le patron d'activation cérébrale des novices au posttest était en effet fortement cohérent avec une récupération en mémoire épisodique. Le fait de présenter les réponses scientifiquement correctes aux novices a donc créé une trace en mémoire épisodique et semble donc avoir rendu disponible la réponse scientifique dans leur structure cognitive, du moins à court terme. Or, cela est cohérent avec certains postulats issus de modèles de changement conceptuel adhérent à la séquence B. Par exemple, il convient de rappeler que Potvin (2013) postule que la première étape de la séquence longitudinale B doit être de rendre disponible dans la structure cognitive de l'apprenant le concept scientifique ou, à tout le moins, de l'information en lien avec ce concept. Potvin (2013, p. 30) décrit ainsi cette étape: « the condition of availability (or initial assimilation) of scientific conceptions (or either parts of them or crucial information about them) ».

Le deuxième argument est à l'effet que le patron d'activation cérébrale observé au posttest n'était que peu ou pas du tout cohérent avec un état de conflit cognitif, comme l'aurait été une activation plus grande du CCA au posttest comparativement au prétest. En effet, tel que brièvement abordé au chapitre 2 du présent mémoire, le CCA est une région fortement associée à la gestion du conflit cognitif qui survient en présence d'informations ou données extérieures contradictoires aux conceptions, théories ou modèles explicatifs détenus par l'apprenant dans sa structure cognitive. Cette conclusion s'appuie notamment sur des études de neuroimagerie qui ont placé des participants devant des informations ou données extérieures entrant en conflit avec leurs théories. Par exemple, Fugelsang et Dunbar (2005) ont utilisé l'IRMf afin de mesurer l'activité cérébrale d'un groupe d'étudiants universitaires ($N = 14$) alors qu'ils avaient à évaluer (1) des stimuli n'entrant pas en conflit avec les théories qu'ils possédaient *a priori* (p. ex. : un antidépresseur améliore l'humeur) versus (2) des stimuli entrant en conflit avec les théories qu'ils possédaient *a priori* (p. ex. : un antibiotique améliore l'humeur). Une activation significativement plus grande du CCA a été observée dans la condition 2 comparativement à la condition 1. Des méta-synthèses (p. ex. : Botvinick, 2007; Botvinick *et al.*, 2004) ont par ailleurs confirmé ce rôle majeur du CCA dans la gestion du conflit cognitif. C'est donc sur ce corpus de littérature qu'il est possible de se baser pour affirmer que l'intervention utilisée dans la présente étude ne semble pas avoir induit un état de conflit cognitif chez les novices, puisqu'une activation du CCA n'a été observée ni pour l'évaluation des stimuli scientifiques ni pour celle des stimuli naïfs lors du posttest.

Bref, compte tenu de ces deux arguments, il peut être raisonnablement conclu que l'intervention employée dans la présente étude, sans constituer une preuve empirique de la supériorité de l'une ou l'autre de ces séquences, s'apparente davantage à la séquence longitudinale B plutôt qu'à la séquence longitudinale A. Cela étant établi, il devient dès lors pertinent d'examiner le potentiel éventuel de la trace épisodique

emmagasinée par les novices en lien avec la représentation scientifiquement correcte du circuit électrique.

Selon Ohlsson (2009), les traces emmagasinées en mémoire épisodique représentent des unités cognitives de très petite taille qui peuvent subséquemment, moyennant des expériences ultérieures vécues par le participant, contribuer à la formation de concepts et de systèmes conceptuels dans leur structure cognitive. Bref, dans le cas des novices de la présente étude, il pourrait être postulé que ces traces pourraient éventuellement contribuer à la réalisation d'un changement conceptuel en combinaison avec d'autres expériences et interventions de nature plus pédagogique que vivraient les novices dans le futur. Dans la même veine, tel que précédemment décrit, Potvin (2013, p. 30) décrit la première étape du changement conceptuel de son modèle comme la nécessité de rendre disponible dans la structure cognitive de l'apprenant les concepts scientifiques désirés ou, à tout le moins « either parts of them or crucial information about them ». Potvin (2013) apparente d'ailleurs cette disponibilité initiale à une assimilation piagétienne. Or, dans la présente étude, compte tenu des réponses scientifiquement correctes fournies par les novices au posttest, alors qu'ils ne fournissaient que des réponses incorrectes au prétest, il pourrait être argumenté que les novices ont réalisé une modification minime et probablement de courte durée de leur structure cognitive afin d'intégrer temporairement la représentation scientifiquement correcte de circuit électrique. Cette modification pourrait probablement être attribuée à une assimilation cognitive minime de courte durée. Par conséquent, en vertu du modèle de Potvin, il est possible que cette assimilation minime de courte durée, en combinaison encore une fois à d'autres expériences et interventions de nature davantage pédagogique, auraient pu faire en sorte de rendre disponible à plus long terme le concept de circuit électrique dans la structure cognitive des novices.

Par ailleurs, bien que semblant peu fréquents dans la littérature, il existe néanmoins certains modèles de changement conceptuel qui mettent un accent spécifique plus important sur la mémoire épisodique dans le processus de changement conceptuel. À titre d'exemple, dans un modèle de changement conceptuel plus ancien, soit le « generative learning model » (Osborne et Freyberg, 1985; Osborne et Wittrock, 1983), la mémoire épisodique est explicitement identifiée comme étant un élément important dans le changement conceptuel. Ce modèle décrit notamment des éléments tels les « stores of images » et les « episodes » comme contribuant au processus de genèse d'un nouveau concept et s'expriment en ces mots (Osborne et Wittrock, 1993, p. 493) :

People retrieve information from long-term memory and use their information processing strategies to generate meaning from the incoming information, to organize it, to code it, and to store it in long-term memory.

Dans un autre ordre d'idées, les résultats obtenus dans la présente étude méritent d'être mis en comparaison avec les résultats des études de Masson *et al.* (2014) et de Brault Foisy *et al.* (2015). Dans ces deux études antérieures, il a été observé que les experts en sciences, ayant présumément déjà complété un changement conceptuel, activaient des régions cérébrales inhibitrices pour répondre correctement à des questions sous-tendant une conception alternative. Or, dans la présente étude, même si les novices ont répondu au posttest de façon scientifiquement correcte, comme les experts des deux études antérieures, une activation des régions cérébrales sous-tendant le contrôle inhibiteur n'a pas été observée. Le patron d'activation cérébrale des novices n'était donc pas le même que celui des experts, même si, sur le plan comportemental, experts et novices fournissaient des réponses scientifiquement correctes. Ceci semble ainsi suggérer deux choses. De un, l'expertise scientifique liée à un changement conceptuel complété semble consister davantage qu'en un simple changement dans le type de réponses d'un apprenant, de scientifiquement incorrectes

à scientifiquement correctes. De deux, cela semble également suggérer que le simple fait de fournir les réponses correctes à des apprenants des sciences, une intervention qui peut survenir en salle de classe de sciences notamment lors de la remise d'un devoir corrigé ou d'un examen corrigé, n'est pas une intervention pédagogique efficace. En effet, fournir les réponses scientifiquement correctes ne provoque pas, tel que constaté dans la présente étude, une modification du patron d'activation cérébrale des novices vers un patron d'activation experte. De telles conclusions sont d'ailleurs en conformité avec divers postulats émis par des théoriciens du changement conceptuel. Par exemple, Pines et West (1986, p. 584) s'expriment comme suit à ce sujet dans l'un des articles fondateurs de leur modèle de changement conceptuel :

[...] although the ability to state some piece of public knowledge-like "Bob Hawke is Prime Minister of Australia"-following instruction may represent a change in behavior, it may not count as meaningful learning or a change in understanding for the constructivist. Such changes in knowledge that constitute rote memorization or an ability to regurgitate propositions verbatim do not exemplify learning or understanding: more often, they exemplify the lack of meaningful learning and understanding [...]

Dans la même veine, mais plus récemment, concernant l'apprentissage dit « par coeur », Vosniadou *et al.* (2001) écrivaient en outre ce qui suit:

This approach does not give students enough time to achieve a qualitative understanding of the concepts being taught. On the contrary, it encourages the casual memorization of facts, and it is very likely to lead to logical incoherence and misconceptions.

Enfin, dans la même veine, quantité de modèles de changement conceptuel postulent que la simple addition d'une information ou d'un fait nouveau (addition factuelle) à la structure cognitive de l'apprenant, donc une addition pouvant être associée à ce qu'il s'est produit dans la présente étude, est un phénomène rencontré fréquemment dans

l'apprentissage des sciences, mais qu'il ne s'agit pas d'un changement conceptuel *per se*.

En effet, plusieurs modèles postulent deux types de changement conceptuel, pouvant être catégorisés en faible et fort (Tyson *et al.*, 1997), ainsi que des changements liés à l'addition factuelle d'information qui ne sont pas considérés comme étant un changement conceptuel. Par exemple, Posner *et al.* (1982) et Strike et Posner (1992) traitent de l'addition factuelle dans leur modèle et la décrivent comme une « accretion » à la structure cognitive qui ne représente pas un changement conceptuel. Carey (1985a, 2011) prévoit également cette addition factuelle dans son modèle et la décrit comme étant une accumulation de savoir n'impliquant pas de *restructuration* de la structure cognitive de l'apprenant, et donc pas de changement conceptuel. En effet, cette auteure prévoit qu'un changement conceptuel doit être constitué d'une restructuration forte ou, à tout le moins d'une restructuration faible, et ne considère pas cette addition factuelle comme étant une restructuration même faible. Similairement, Thagard (1991, 1992) décrit cette addition factuelle comme étant l'addition d'un nouvel exemple ou d'une nouvelle règle faible et postule que ce type d'addition est au plus bas de la *hiérarchie* de changements de la structure cognitive qui peuvent être considérés comme dénotant un changement conceptuel. En effet, selon la hiérarchie proposée par cet auteur, il existerait neuf types de changement conceptuel, allant en ordre croissant de la restructuration la plus faible de la structure cognitive vers la restructuration la plus forte. Cet auteur décrit les deux types de changement conceptuel les plus forts comme étant le « branch switching » et le « tree jumping » et place donc la simple addition factuelle au plus bas de cette hiérarchie. Schwedes et Schmidt (1992), pour leur part, décrivent cette addition factuelle comme étant l'addition d'une nouvelle idée ou règle au groupe d'idées et de règles se trouvant dans la périphérie d'un *noyau dur* du concept. Selon ces auteurs, ce noyau dur est constitué des idées et règles centrales déterminant la compréhension du concept (centre du noyau), et un changement conceptuel doit impliquer à tout le

moins une *altération* de ce noyau dur. Un changement survenant dans la périphérie de ce noyau dur ne constitue donc pas un changement conceptuel selon ces auteurs. Tiberghien (1994) décrit pour sa part l'addition factuelle comme une addition de *faits expérimentaux* au champ expérimental de référence, qui serait dans la présente étude le champ de l'électricité. Selon cette auteure, un changement conceptuel de type faible serait caractérisé par un changement *sémantique*, à savoir une restructuration du sens attribué à un objet ou à un événement (p. ex. : sens attribué au concept d'électricité ou de circuit électrique). Or, la simple addition de faits expérimentaux n'entraîne pas, selon le modèle de cette auteure, de changement sémantique et donc pas de changement conceptuel de type même faible.

Dans un autre modèle de changement conceptuel bien connu, Chi et ses collaborateurs (Chi, de Leeuw, *et al.*, 1994; Chi et Roscoe, 2002; Chi, Slotta et de Leeuw, 1994) traitent explicitement de la conception alternative liée au modèle de l'unipôle. Ces auteurs postulent que trois catégories ontologiques majeures existent (*entités, processus, états mentaux*) avec des sous-catégories multiples au sein de chacune de ces trois catégories majeures, comme la sous-catégorie *substances* au sein des *entités*. La catégorie des *entités* est déterminée par des caractéristiques physiques comme celle d'avoir un volume, une masse, une couleur, etc. En revanche, la catégorie des *processus* est déterminée par des caractéristiques très différentes, les principales étant celles d'être un événement survenant sur une période de temps donnée et de pouvoir être associé à une relation de cause à effet. Concernant l'électricité, Chi et ses collaborateurs écrivent que l'électricité est généralement catégorisée par les novices comme étant une *substance* au sein de la catégorie plus générique *entités*, par analogie avec les caractéristiques physiques de l'eau qui s'écoule dans un système de tuyauterie. Un changement conceptuel en lien avec cette conception doit consister en une recatégorisation ontologique de l'électricité de la catégorie *entités* vers la catégorie *processus*, attribuant ainsi à l'électricité les caractéristiques d'être un événement se déroulant dans le temps et associé à une

relation causale (c.-à-d. : flux d'électrons causé par une différence de potentiel électrique ou voltage). Selon ces auteurs, cette recatégorisation ontologique liée à l'électricité est un apprentissage difficile et l'addition factuelle ne résulte pas en une telle recatégorisation.

Enfin, Dole et Sinatra (1998, p. 112), dans leur modèle impliquant facteurs cognitifs, motivationnels et sociaux, résumant en ces mots l'effet de la simple addition factuelle à la structure cognitive : « fundamental change in the mental representations of concepts *cannot occur* through assimilation processes of addition [...] ».

5.4 Limites de la présente étude

La présente étude contient plusieurs limites, parmi lesquelles quatre semblent particulièrement importantes à discuter : (1) le manque de suivi longitudinal des novices; (2) le type de participants utilisés; (3) la nature essentiellement non pédagogique de l'intervention employée; (4) la technique de définition des ROI.

5.4.1 Manque de suivi longitudinal

Dans un premier temps, un suivi longitudinal sur une plus longue durée des novices n'a pas été effectué. Un tel suivi aurait par exemple pu consister à utiliser un posttest différé (post-posttest), voire plus d'un posttest différé (post-post-posttest), afin d'observer comment varieraient dans le temps leur taux d'exactitude, leur temps de réaction et leur activation cérébrale devant les stimuli de la tâche. Cela aurait permis de bénéficier de l'un des principaux avantages liés à l'utilisation d'un devis longitudinal quantitatif, à savoir observer plus fiablement, au moyen de modèles d'équations structurelles, la relation liant entre elles deux ou plusieurs variables (Caruana *et al.*, 2015).

Dans le cas présent, il aurait ainsi été permis d'observer la relation liant entre eux dans le temps le taux d'exactitude, le temps de réaction et l'activation cérébrale. Bien que cela demeure entièrement hypothétique, un posttest différé *éloigné* dans le temps aurait pu, par exemple, permettre d'observer qu'une diminution dans le taux d'exactitude à cet éventuel posttest différé serait associée à une diminution dans l'activation des régions cérébrales associées à la récupération épisodique. Donc, la trace épisodique des réponses correctes que les novices avaient emmagasinée en mémoire aurait été considérablement diminuée au moment du posttest différé, entraînant ainsi une diminution marquée du taux d'exactitude. Une telle observation aurait été en conformité avec la théorie d'espacement des apprentissages. Selon cette théorie, appuyée substantiellement par les études empiriques (Bradley *et al.*, 2014; Callan et Schweighofer, 2010), une seule période d'apprentissage concentrée (« massed repetition ») d'un concept, comme dans la présente étude, est moins bénéfique pour la mémorisation à long terme comparativement à des périodes d'apprentissage multiples moins concentrées, mais plus espacées (« distributed repetition »). Cela s'explique notamment par (1) le fait que des régions cérébrales associées à la mémorisation se désactivent graduellement lors d'une seule période d'apprentissage concentrée, mais qu'elles demeurent activées lors des périodes d'apprentissage espacées (Callan et Schweighofer, 2010) et, également, par (2) le fait que les réseaux de neurones dans lesquels un apprentissage a été encodé voient la force de leurs interconnexions s'affaiblir graduellement après une période de non-utilisation de cet apprentissage (Munz *et al.*, 2014), ce qui correspond à la loi de l'oubli (Wixted, 2004).

Une autre possibilité qui aurait pu être observée est à l'effet que, dans un éventuel posttest différé, mais relativement *rapproché* dans le temps et administré par exemple seulement trois semaines plus tard, les novices auraient tout de même continué à fournir un taux assez élevé de réponses correctes, mais que leur temps de réaction aurait été allongé et qu'une activation des régions cérébrales sous-tendant le contrôle

inhibiteur aurait été observée. Cela aurait pu être causé par un affaiblissement moins marqué de la trace épisodique des réponses correctes, par rapport au posttest différé éloigné dans le temps discuté ci-dessus. Cette trace épisodique aurait alors pu être d'un niveau de force (1) encore suffisant pour récupérer les réponses scientifiquement correctes et produire un taux d'exactitude assez élevé, mais (2) insuffisant pour récupérer les réponses correctes sans avoir à inhiber sa tendance à répondre en conformité avec sa conception alternative. Il aurait donc pu y avoir une « égalisation » de la trace épisodique des réponses correctes, apprises trois semaines au préalable, avec la tendance à répondre selon sa conception alternative. Cette conception est en effet généralement solidement emmagasinée dans des réseaux de neurones de la mémoire à long terme, tel qu'inféré des résultats obtenus par Masson *et al.* (2014) et Brault Foisy *et al.* (2015), discutés au chapitre 2.

5.4.2 Type de participants utilisés

Dans un deuxième temps, une autre limite importante de la présente étude est en rapport avec le choix des participants, soit des adultes novices en électricité ayant été recrutés notamment à cause de la difficulté posée par la collecte de données d'IRMf auprès d'enfants. Ainsi, les participants choisis ont été considérés comme étant des novices au regard du concept de circuit électrique simple, puisqu'ils ont répondu systématiquement en conformité avec la conception alternative du modèle de l'unipôle autant au questionnaire administré quelques jours avant la séance de neuroimagerie que pendant le prétest. En outre, ces participants n'avaient suivi aucun cours de sciences depuis l'école secondaire et ils étudiaient dans divers baccalauréats en sciences humaines, où ils n'étaient donc pas en contact avec les sciences naturelles. Malgré tout cela, ces participants étaient néanmoins des étudiants universitaires ayant suivi au préalable, dans leur cursus primaire et secondaire, des cours de sciences naturelles. Il est donc bien probable qu'ils aient bénéficié,

précédemment dans leur cursus, d'un enseignement par rapport au concept de circuit électrique et que la trace de ce concept présente dans leur mémoire ait tout simplement été très faible, mais bien présente, lors du prétest. Ainsi, le taux élevé de réponses correctes fournies par les participants au posttest pourrait s'expliquer par une réactivation de cette trace fortement affaiblie, plutôt que par la formation d'une trace *de novo*. Donc, dans cette éventualité, ces participants n'étaient alors vraisemblablement pas des novices complets par rapport au concept électrique, comme l'auraient été des enfants en début de cursus primaire n'ayant jamais été exposés à un enseignement des circuits électriques.

L'impact potentiel de cette limite peut être associé à la généralisabilité des résultats de la présente étude (Kukull et Ganguli, 2012). En effet, puisqu'il est probable que les participants n'aient pas été complètement novices, les résultats et les interprétations de la présente étude peuvent plus difficilement être généralisés à l'ensemble de la population de novices en électricité. En outre, dans la même veine, il peut être considéré que la majorité de la population de novices en électricité est composée d'enfants, et non d'adultes. Or, des différences existent entre la structure et le fonctionnement du cerveau adulte, pleinement développé, comparativement au cerveau des enfants, encore immature, notamment en ce qui touche la structure et l'activation des régions préfrontales sous-tendant le contrôle inhibiteur (p. ex. : van Duijvenvoorde *et al.*, 2008). Cela est donc un argument de plus affectant la généralisabilité des résultats et des interprétations de la présente étude.

5.4.3 Nature non pédagogique de l'intervention

Dans un troisième temps, l'intervention utilisée dans la présente étude visait à faire en sorte que les novices surmontent leur conception alternative afin de vérifier les effets produits au niveau du temps de réaction et de l'activité cérébrale. Cette intervention

ne visait donc pas à produire un apprentissage et n'était par conséquent pas de nature pédagogique *per se*. Cette étude était ainsi de nature davantage fondamentale qu'appliquée (Gaudreau, 2011), limitant donc l'inférence d'implications pédagogiques. Malgré cela et tel que déjà abordé précédemment dans différentes sections du présent mémoire, certains liens modestes et prudents peuvent néanmoins être établis entre les résultats obtenus dans la présente étude et la pédagogie des sciences. Ces liens peuvent se résumer comme suit :

(1) Fournir les réponses correctes à des apprenants novices en sciences ne semble pas être une intervention efficace pour produire un apprentissage de concepts contre-intuitifs. Cette conclusion repose sur le fait que le patron d'activation cérébrale des novices dans la présente étude, après présentation des réponses scientifiquement correctes, n'était pas le même que le patron d'activation cérébrale des experts observé dans les études de Masson *et al.* (2014) et de Brault Foisy *et al.* (2015). Or, fournir les réponses correctes est une intervention observée parfois en salle de classe de sciences, par exemple lors de la correction d'un devoir ou d'un examen.

(2) La deuxième implication est de nature plus hypothétique et est en lien avec la section 1.9 du premier chapitre, où un questionnement était décrit quant à la présence ou non du contrôle inhibiteur tout au long de la séquence longitudinale menant à un changement conceptuel complété ainsi qu'aux implications pédagogiques éventuelles liées à cela. Or, selon les résultats de la présente étude et leur analyse en lien avec les modèles de changement conceptuel, l'inhibition de la conception alternative ne semble pas être impliquée dans l'étape préliminaire au changement conceptuel, soit l'addition factuelle, et il semble donc qu'apprendre aux élèves à inhiber leur conception alternative à cette étape préliminaire serait inutile.

En effet, tel que décrit à la section 5.3, l'intervention utilisée dans la présente étude semble avoir provoqué une addition factuelle temporaire à la structure cognitive des

novices, addition reconnue par plusieurs modèles de changement conceptuel comme n'étant pas un changement conceptuel même de type faible. Toutefois, ce genre d'addition survient fréquemment en salle de classe de sciences, où la production de « bonnes réponses » est souvent l'objectif poursuivi (Potvin, 2013, p. 20). Ainsi, cette addition factuelle pourrait être considérée comme une étape préliminaire survenant dans la pratique avant le commencement d'un changement conceptuel. Compte tenu que l'activation des régions cérébrales inhibitrices n'a pas été observée au posttest de la présente étude, il semble donc que les novices n'aient pas eu à inhiber leur conception alternative pour fournir des réponses correctes au posttest. Cela suggère par conséquent qu'apprendre à des apprenants novices à inhiber une conception alternative, par exemple au moyen d'alertes émotives (Houdé *et al.*, 2000, 2001), pourrait s'avérer inutile lors de cette étape préliminaire du changement conceptuel. La cause à cela serait le fait que le concept scientifique à faire apprendre n'est pas encore suffisamment disponible dans leur structure cognitive pour qu'il puisse y avoir inhibition de la conception alternative (Potvin, 2013; Potvin *et al.*, 2015; Potvin et Cyr, 2017a, 2017b). En effet, Potvin (2013, p. 29) écrit à ce sujet que « learners should therefore be given the chance to benefit from the availability of a “new branch” to grab onto before being invited or incited to let go of the “old one” ».

5.4.4 Technique de définition des ROI

Enfin, dans la présente étude, la technique choisie pour définir des ROI a reposé sur des méta-analyses préalables afin de définir, de façon fonctionnelle, des régions d'intérêt. Or, compte tenu de la non-correspondance parfaite entre les cerveaux de différents participants utilisés d'une étude à l'autre, la technique la plus recommandée dans la littérature scientifique semble être celle de définir fonctionnellement des ROI issues des participants mêmes d'une étude (p. ex. : Friston *et al.*, 2006; Poldrack, 2007; Saxe *et al.*, 2006). Cette technique consiste à observer l'activité cérébrale des

participants d'une étude lors de l'exécution d'une tâche de contrôle en lien avec l'hypothèse soulevée, pour ensuite comparer l'activité cérébrale observée dans cette tâche de contrôle avec l'activité cérébrale observée dans la tâche expérimentale. Concrètement, concernant l'hypothèse du contrôle inhibiteur H_2 de la présente étude, cette technique de définition de ROI aurait consisté dans les trois étapes suivantes :

(1) faire exécuter aux novices une tâche du Go/No-go et établir les groupements de voxels ou « clusters » les plus activés pendant l'évaluation de stimuli No-go réussis vs l'évaluation de stimuli Go, permettant ainsi de déterminer les « clusters » soutenant le contrôle inhibiteur dans le cerveau même des participants;

(2) faire exécuter aux novices la tâche expérimentale utilisée dans la présente étude, permettant ainsi de déterminer les « clusters » significativement plus activés après vs avant pour l'évaluation des stimuli naïfs, scientifiques et de contrôle;

(3) comparer les « clusters » obtenus en (1) vs les clusters obtenus en (2) pour vérifier si ces « clusters » se chevauchent significativement (H_2 confirmée) ou pas (H_2 infirmée).

La même procédure aurait pu être employée pour l'hypothèse H_3 , en utilisant par exemple une tâche de jugement de reconnaissance classique. Toutefois, cette technique de définition des ROI n'a pas été employée dans la présente étude à cause de difficultés logistiques. En effet, tel que décrit au chapitre 3, le temps de collecte des données dans un appareil d'IRMf est relativement long, nécessitant notamment (1) au minimum une vingtaine de stimuli par condition afin que l'étude puisse atteindre une puissance statistique suffisante et, également, (2) des périodes de repos (croix de fixation) afin de permettre à la réponse hémodynamique associée au stimulus précédent de redescendre. En outre, le coût associé à une période de 60 minutes de collecte de données par IRMf est particulièrement élevé, se situant aux

environs de 600 \$. Or, dans la présente étude, trois conditions étaient présentes (stimuli naïfs, scientifiques et de contrôle), donnant ainsi lieu à la nécessité de présenter un grand nombre de stimuli associés seulement à la tâche expérimentale. Conséquemment, les ressources logistiques (temps, budget) ont été insuffisantes pour permettre l'exécution supplémentaire de tâches de contrôle, comme le Go/No-go ou une tâche de jugement de reconnaissance.

CHAPITRE VI

CONCLUSION

Tel que décrit lors du premier chapitre du présent mémoire, les conceptions alternatives des apprenants des sciences constituent un problème éducatif bien documenté (diSessa, 2014) et il y a généralement consensus à l'effet que, afin d'apprendre certains concepts scientifiques contre-intuitifs, les apprenants doivent réaliser un changement conceptuel (Rusanen, 2014; Rusanen et Lappi, 2014). Des études récentes utilisant une approche psycho-cognitiviste (p. ex. : Kelemen *et al.*, 2013; Shtulman et Harrington, 2015; Shtulman et Valcarcel, 2012) et, *a fortiori*, des études récentes utilisant une approche neuroscientifique (Brault Foisy *et al.*, 2015; Masson *et al.*, 2014) ont permis de déterminer que des experts en sciences, présumés avoir déjà complété un changement conceptuel, devaient activer des régions cérébrales sous-tendant les mécanismes de (1) contrôle inhibiteur et de (2) récupération en mémoire afin de répondre correctement à des questions impliquant une conception alternative. Toutefois, les mécanismes cognitifs mobilisés par des novices en sciences afin de surmonter leurs conceptions alternatives et, donc, de répondre correctement à ce type de questions, demeurent peu ou pas étudiés. Compte tenu que la majorité des apprenants des sciences sur les bancs d'école sont des novices plutôt que des experts en sciences, il devient dès lors pertinent de s'intéresser aux mécanismes cognitifs mobilisés par les novices.

Au moyen de l'IRMf, la présente étude voulait ainsi vérifier les hypothèses selon lesquelles des novices en électricité mobiliseraient les deux mêmes mécanismes

cognitifs que les experts pour surmonter leur conception alternative et répondre de façon scientifiquement correcte à des questions impliquant une conception alternative. Pour ce faire, un groupe de novices ont eu à évaluer la valeur de vérité de différents types de stimuli qui leur étaient présentés lors d'un prétest et d'un posttest, alors que leur temps de réaction et leur activité cérébrale étaient mesurés à l'aide d'un appareil d'IRMf. Entre le prétest et le posttest, les réponses scientifiquement correctes aux stimuli ont été présentées aux novices afin de leur permettre de surmonter leur tendance à répondre en conformité avec leur conception alternative et, donc, de corriger leurs erreurs naïves. La comparaison après vs avant montre tout d'abord que, sur le plan comportemental, les novices ont effectivement réussi à surmonter leur conception alternative, car le taux d'exactitude dans leurs réponses est significativement plus grand au posttest comparativement au prétest. Puis, la comparaison après vs avant pour le temps de réaction montre toutefois que les novices n'ont pas été plus lents à répondre lors du posttest, suggérant ainsi que le mécanisme de contrôle inhibiteur n'a pas été mobilisé.

Enfin, la comparaison après vs avant pour l'activité cérébrale triangule le résultat précédent et démontre une activation plus grande, au posttest, de quatre groupes de régions cérébrales, à savoir : (1) le cortex rostrofrontal (BA 10); (2) les gyri angulaires/lobules pariétaux inférieurs (BA 39/40), *a fortiori* à gauche; (3) le lobule pariétal supérieur médian, impliquant le précunéus et le cortex cingulaire postérieur (BA 7/23/31); (4) le putamen/globus pallidus. En vertu notamment de nombreuses méta-analyses s'étant penchées sur le contrôle inhibiteur (p. ex. : Buchsbaum *et al.*, 2005; Simmonds *et al.*, 2005) ou sur la récupération en mémoire épisodique (p. ex. : Spaniol *et al.*, 2009; Vilberg et Rugg, 2008), il a été conclu que ce patron d'activation cérébrale représentait une récupération en mémoire épisodique et procédurale, mais ne représentait pas une mobilisation du contrôle inhibiteur.

Conséquemment, la conclusion globale inférée de ces observations est à l'effet que, afin de surmonter leur conception alternative, les novices en sciences activent seulement un des deux mécanismes cognitifs mobilisés par les experts, soit celui de récupération en mémoire. Donc, bien que les novices aient répondu de façon scientifique au posttest, comme les experts d'études antérieures, leur patron d'activation cérébrale demeurerait néanmoins différent de celui observé chez ces experts. Cette observation suggère que le simple fait de corriger ses erreurs naïves par des réponses scientifiques n'est pas en soi suffisant pour compléter un changement conceptuel. Bien que les inférences en termes d'implications pédagogiques pouvant découler de cette conclusion soient somme toute limitées, il est tout de même possible d'en inférer que le fait de présenter les réponses scientifiquement correctes à des novices en sciences ne semble pas être une intervention efficace pour l'apprentissage de concepts scientifiques contre-intuitifs. Une telle intervention, parfois observée en salle de classe de sciences lorsque le praticien corrige un devoir ou un examen en fournissant les réponses correctes sans autre explication, ne serait ainsi pas à encourager.

La présente étude comporte par ailleurs des limites, parmi lesquelles quatre semblent particulièrement importantes à souligner : (1) le manque de suivi longitudinal des novices au moyen de posttests différés accompagnés de mesures comportementales et cérébrales, qui auraient permis de vérifier différentes hypothèses supplémentaires quant au processus de changement conceptuel; (2) le type de participants recrutés, qui étaient des étudiants universitaires n'étant vraisemblablement pas des novices complets en sciences au même titre que l'auraient été des élèves du primaire, limitant ainsi la généralisabilité des résultats et des interprétations de la présente étude; (3) la nature essentiellement non pédagogique de l'intervention utilisée, qui limite considérablement les inférences pouvant être faites en termes d'implications pédagogiques; (4) enfin, certains choix méthodologiques, tout particulièrement le choix de technique employé pour définir des ROI.

En outre, la présente étude n'a pas été menée de façon isolée, mais s'inscrit plutôt, en combinaison entre autres aux études de Masson *et al.* (2014) et de Brault Foisy *et al.* (2015), dans un programme de recherche plus vaste dont l'objectif poursuivi est de développer un modèle neuroscientifique du changement conceptuel. Ce modèle, une fois établi, pourrait être susceptible de mieux guider les praticiens dans le choix de stratégies et techniques d'enseignement favorisant l'apprentissage de concepts scientifiques contre-intuitifs. Ce programme s'articule particulièrement autour de deux axes de recherche (Masson, 2012). Le premier axe est de nature davantage fondamentale et vise à établir une meilleure compréhension des mécanismes cognitifs impliqués dans le processus de changement conceptuel. Le deuxième axe s'appuie sur les découvertes du premier, est de nature davantage appliquée et vise à vérifier l'efficacité de certaines interventions pédagogiques à produire un changement conceptuel. Donc, considérant ces deux axes, les limites de la présente étude, déjà décrites précédemment, ainsi que les limites globales du corpus d'études neuroscientifiques ayant examiné le changement conceptuel en sciences (section 2.3.3.3 du présent mémoire), trois possibilités d'études futures consisteraient en ce qui suit :

(1) Une étude longitudinale de cohorte, dans laquelle un groupe d'étudiants seraient suivis au moyen de données comportementales (p. ex. : relevés de notes, taux d'exactitude à des tests conceptuels, temps de réaction) et cérébrales (p. ex. : activité cérébrale mesurée par IRMf) à partir du début de leur cursus primaire jusqu'à la fin de leur cursus secondaire, voire au-delà. Les données pourraient par exemple être collectées à des moments critiques de ces cursus. À titre d'exemple, dans le cas précis du concept de circuit électrique, une première collecte de données pourrait survenir au deuxième cycle du primaire (3^e ou 4^e années), alors qu'aucun enseignement formel de concepts d'électricité ne devrait encore avoir eu lieu et que les élèves seraient suffisamment matures pour permettre assez aisément une collecte de données au

moyen de l'IRMF. En effet, le curriculum scolaire au Québec (MELS, 2001) prévoyant que les concepts liés à l'électricité soient vus au troisième cycle du primaire (5^e ou 6^e années), des élèves du deuxième cycle devraient encore être des novices complets en rapport avec ces concepts. Cette première collecte de données pourrait ensuite se poursuivre par une deuxième collecte de données ayant lieu lors du premier cycle du secondaire (7^e ou 8^e années), c'est-à-dire après l'enseignement formel de concepts d'électricité survenu au troisième cycle du primaire, mais avant l'enseignement formel plus poussé de ces concepts qui est prévu au curriculum lors du deuxième cycle du secondaire (9^e à 11^e années) (MELS, 2006). Enfin, une dernière collecte de données pourrait avoir lieu après la fin du cursus secondaire, soit après la complétion de la 11^e année, alors que les élèves ont été exposés à l'enseignement formel plus poussé de notions d'électricité qui survient au deuxième cycle du secondaire. Un tel suivi longitudinal de cohorte, bien que très difficilement réalisable sur le plan logistique, pourrait néanmoins être fort riche en termes de nouvelles connaissances produites mettant en relation données comportementales et données cérébrales.

(2) Une étude (quasi)expérimentale qui vérifierait l'efficacité d'une intervention pédagogique basée sur l'inhibition des conceptions alternatives des élèves. En effet, une telle étude toucherait l'axe 2 décrit ci-dessus et s'appuyerait sur des résultats obtenus par les études touchant l'axe 1, qui ont conclu à l'importance du mécanisme de contrôle inhibiteur dans le processus de changement conceptuel. De plus, une telle étude serait en lien avec la deuxième limite soulevée à la section 2.3.3.3 du présent mémoire. Tel que déjà décrit précédemment, une intervention pédagogique représentant un candidat sérieux pour une telle étude serait l'intervention développée notamment par Houdé *et al.* (2000, 2001), soit l'alerte émotive. Une alerte émotive prend généralement la forme suivante (Potvin, 2013, p. 30) :

« Attention, dans telle ou telle circonstance, il te semblera intuitivement tentant de penser ou de répondre en conformité avec telle ou telle conception que tu as, mais tu ne devrais pas, car cela t'amènera souvent à commettre telle ou telle erreur ».

Tel qu'il peut être observé dans ce verbatim, la forme de cette alerte émotive fournit des informations précises à l'élève quant au piège à éviter. Cela est en conformité avec la littérature antérieure, dans laquelle l'alerte émotive testée était de deux types, soit (1) une alerte plus générale liée à un contexte donné pouvant impliquer des difficultés ou pièges, ou (2) une alerte plus spécifique liée à une difficulté ou piège précis.

Le premier type d'alerte consistait à avertir les apprenants qu'ils seraient confrontés à un contexte difficile et les invitait à être vigilants, sans leur préciser en quoi consisteraient la ou les difficulté(s) ou piège(s). L'efficacité de ce type d'alerte a principalement été testée dans la résolution de problèmes contre-intuitifs en arithmétique (Dewolf, Van Dooren, Cimen et Verschaffel, 2014; Reusser et Stebler, 1997; Yoshida, Verschaffel, et De Corte, 1997). Les résultats obtenus étaient généralement à l'effet que ce type d'alerte ne produisait pas une réussite supérieure dans la résolution de ces problèmes par rapport à un enseignement traditionnel.

Le deuxième type d'alerte consistait à avertir les apprenants de la présence précise d'un ou de plusieurs difficulté(s) ou piège(s), dans un contexte donné. L'efficacité de ce type d'alerte a principalement été testée dans la résolution de tâches contre-intuitives dans le domaine de la résolution de problèmes logiques contre-intuitifs, tel que déjà décrit (Houdé *et al.*, 2001; Houdé et Moutier, 1996, 1999; Moutier *et al.*, 2002) et, également, dans le domaine de la résolution de problèmes contre-intuitifs en géométrie impliquant la distinction entre les concepts d'aire et de périmètre (Babai *et al.*, 2015). Les résultats obtenus étaient généralement à l'effet que ce type d'alerte, contrairement à l'alerte générale, produisait une réussite supérieure par rapport à

l'enseignement traditionnel, et ce, aussi bien dans la résolution de problèmes contre-intuitifs en logique qu'en géométrie. C'est donc ce deuxième type d'alerte, plutôt que le premier, qui semble être le candidat le plus sérieux pour une étude (quasi)expérimentale dans le domaine des sciences.

(3) Une étude vérifiant si le contrôle inhibiteur est un mécanisme cognitif effectivement mobilisé une fois le processus de changement conceptuel complété, ou s'il ne s'agit que d'un mécanisme mobilisé à une étape intermédiaire du processus de changement conceptuel. Cette étude serait en lien avec la première limite mentionnée à la section 2.3.3.3. En effet, les experts utilisés autant dans l'étude de Masson *et al.* (2014) que dans celle de Brault Foisy *et al.* (2015) ont été présumés être des experts ayant déjà complété un changement conceptuel pour le concept en jeu dans l'étude, soit respectivement le concept de circuit électrique dans Masson *et al.* et le concept de chute libre des corps dans Brault Foisy *et al.* Toutefois, ces experts n'étaient en fait que des étudiants dans des baccalauréats en physique et il n'est pas certain qu'ils eussent effectivement complété le processus de changement conceptuel pour les concepts en jeu. En ce sens, il convient ici de rappeler que des études empiriques ont permis d'observer que des étudiants dans des programmes en génie adhéraient encore, dans des proportions non négligeables, autant à la conception alternative du modèle de l'unipôle en électricité (Periago et Bohigas, 2005) qu'à la conception alternative selon laquelle « un corps plus lourd chute plus vite qu'un corps plus léger » en mécanique (Jugueta *et al.*, 2012).

Par conséquent, une future étude pourrait s'intéresser, au moyen de mesures comportementales et cérébrales, à des « superexperts », comme des étudiants dans un doctorat en physique. Il serait particulièrement intéressant, au moyen de l'IRMf, de vérifier si ces « superexperts » doivent toujours mobiliser les régions cérébrales sous-tendant le contrôle inhibiteur lorsqu'ils répondent à des questions impliquant des conceptions alternatives. Bien qu'une étude antérieure déjà décrite (Kelemen *et al.*,

2013), s'étant intéressée à des physiciens professionnels et ayant utilisé comme mesure le temps de réaction, suggère que le contrôle inhibiteur semble toujours présent même chez de tels « superexperts », cette observation ne semble pas avoir été vérifiée, à ce jour, au moyen de l'IRMf. Or, tel que décrit précédemment à la section 1.6 du présent mémoire, l'observation d'un temps de réaction plus long ne permet d'inférer qu'indirectement la mobilisation du mécanisme de contrôle inhibiteur, d'où l'avantage de trianguler cette observation au moyen de l'IRMf, une technique de neuroimagerie qui permet une observation plus directe de ce mécanisme.

En guise de mot de la fin et tel qu'il a déjà été mentionné dans les deux premiers chapitres du présent mémoire, la neuroéducation est une approche de recherche relativement nouvelle qui vise à examiner diverses problématiques éducatives d'un point de vue cérébral. Cette approche n'est pas en opposition avec les autres approches de recherche, par exemple constructiviste et cognitiviste, mais est plutôt complémentaire à ces autres approches avec le même but commun qui est de résoudre différentes problématiques éducatives afin de contribuer à améliorer les pratiques d'enseignement et d'apprentissage.

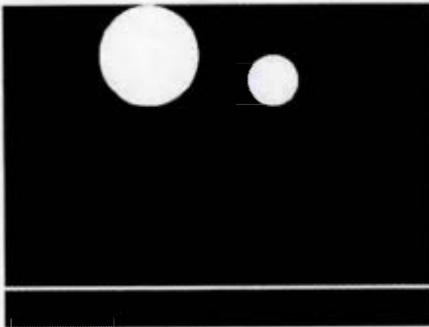
APPENDICE A

QUESTIONNAIRE ADMINISTRÉ AVANT LA SÉANCE DE NEUROIMAGERIE (tiré de Masson, 2012)

APPENDICE A - QUESTIONNAIRE UTILISÉ LORS DE LA SÉLECTION DES PARTICIPANTS

Question 1

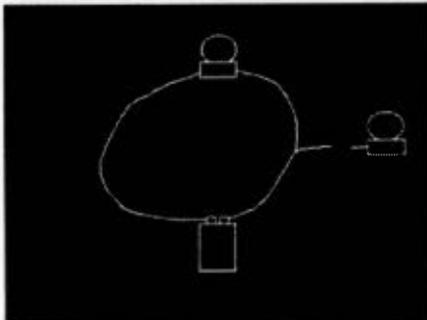
Les deux balles présentées sur l'image ci-dessous sont constituées de plomb. Si on pouvait tenir les deux balles dans nos mains, nous pourrions sentir que les deux balles sont lourdes, mais que la plus grande des deux balles est sensiblement plus lourde. Si on laisse tomber ces deux balles (en même temps et de la même hauteur) sur le plancher de la bibliothèque, qu'observera-t-on selon vous?



- A. Les balles ne tomberont pas; elles flotteront dans l'air.
- B. La balle la plus petite tombera plus vite.
- C. La balle la plus grande tombera plus vite.
- D. Les deux balles tomberont sensiblement à la même vitesse.

Question 2

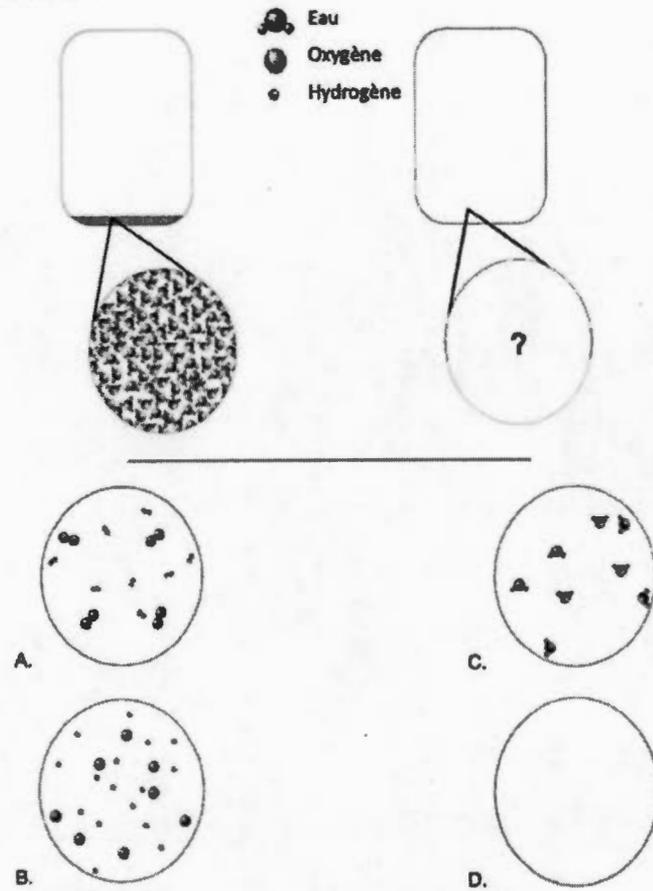
L'image ci-dessous présente un circuit électrique qui comprend : une pile (en bas du schéma), deux ampoules (en haut et à droite du schéma) et des fils (lignes du schéma). Si la pile est fonctionnelle de même que les deux ampoules, que devrait-il arriver?



- A. Les deux ampoules devraient s'allumer.
- B. Seule l'ampoule du haut devrait s'allumer.
- C. Seule l'ampoule de droite devrait s'allumer.
- D. Aucune des deux ampoules ne devraient s'allumer.

Question 3

Si nous chauffons, jusqu'à évaporation complète, une petite quantité d'eau (en gris sur l'image à gauche) dans un contenant fermé, à quoi ressembleront les molécules d'eau après l'évaporation?



Question 4

Selon vous, quel est le but principal d'un scientifique?

- A. Décrire la nature à l'aide d'équations mathématiques.
- B. Imaginer de nouvelles théories.
- C. Démontrer que les théories existantes sont fausses.
- D. Utiliser la science pour trouver des solutions aux problèmes de la société.

Question 5

L'image 1 ci-dessous présente, vue d'en haut, une balle qui roule au sol juste avant qu'on lui donne un coup dans la direction donnée par la flèche. Laquelle des trajectoires présentées à l'image 2 (A, B, C ou D) décrit le mieux le trajet que suivra la balle après le coup?

Image 1

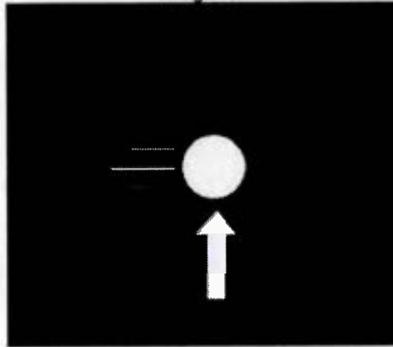
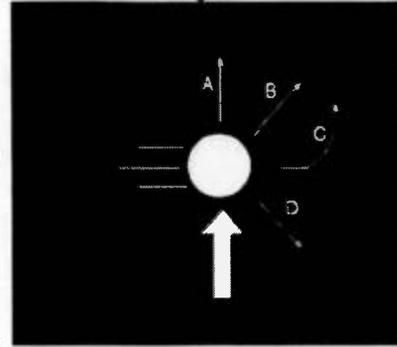
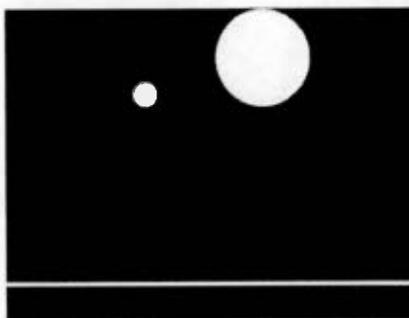


Image 2



Question 6

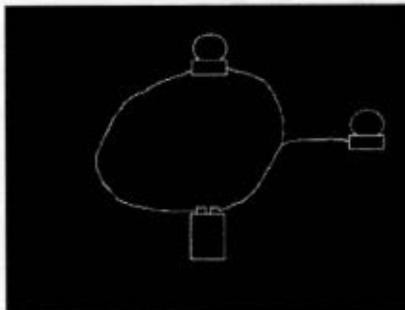
Les deux balles présentées sur l'image ci-dessous sont constituées de plomb. Si on pouvait tenir les deux balles dans nos mains, nous pourrions sentir que les deux balles sont lourdes, mais que la plus grande des deux balles est sensiblement plus lourde. Si on laisse tomber ces deux balles (en même temps et de la même hauteur) sur le plancher de la bibliothèque, qu'observera-t-on selon vous?



- A. La balle la plus petite tombera plus vite.
- B. Les balles ne tomberont pas; elles flotteront dans l'air.
- C. La balle la plus grande tombera plus vite.
- D. Les deux balles tomberont sensiblement à la même vitesse.

Question 7

L'image ci-dessous présente un circuit électrique qui comprend : une pile (en bas du schéma), deux ampoules (en haut à gauche et au dessus de la pile) et des fils (lignes du schéma). Si la pile est fonctionnelle de même que les deux ampoules, que devrait-il arriver?



- A. Les deux ampoules devraient s'allumer.
- B. Seule l'ampoule à droite devrait s'allumer.
- C. Seule l'ampoule en haut devrait s'allumer.
- D. Aucune des deux ampoules ne devraient s'allumer.

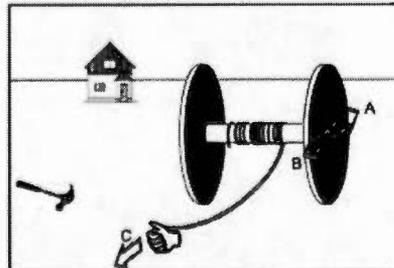
Question 8

L'image 1 ci-dessous présente, vue d'en haut, une balle qui roule au sol juste avant qu'on lui donne un coup dans la direction donnée par la flèche. Laquelle des trajectoires présentées à l'image 2 (A, B, C ou D) décrit le mieux le trajet que suivra la balle après le coup ?



Question 9

Dans un chantier de construction, on trouve un gros rouleau de bois abandonné (un de ces rouleaux qui servent habituellement à enrouler un tuyau de plastique). Le rouleau est posé sur le sol et n'est relié à aucune autre pièce. Si on enroule une corde autour, comme dans le schéma suivant, et qu'on tire dessus doucement dans la direction « C », comment le rouleau va-t-il se comporter ?



- A. Le rouleau se déplacera dans la direction A.
- B. Le rouleau restera immobile.
- C. Le rouleau se déplacera dans la direction C.
- D. Le rouleau tournera sur place.

APPENDICE B

FORMULAIRE DE CONSENTEMENT

APPENDICE B – FORMULAIRE DE CONSENTEMENT

R egroupement N euroimagerie / Q uébec Comité mixte d'éthique de la recherche – RNQ

FORMULAIRE D'INFORMATION ET DE CONSENTEMENT

TITRE DU PROJET DE RECHERCHE

Étude des mécanismes cérébraux sous-tendant les processus de changement conceptuel en physique

RESPONSABLE DU PROJET DE RECHERCHE

Responsable du projet :
Patrice Potvin, Université du Québec à Montréal, 514-987-3000, poste 1290

Collaborateurs :
Kevin N. Dunbar, University of Toronto Scarborough
Martin Riopel, Université du Québec à Montréal
Jonathan Fugelsang, University of Waterloo
Steve Masson, Université du Québec à Montréal

ORGANISME SUBVENTIONNAIRE

Fonds québécois de recherche sur la société et la culture (FQRSC)

PRÉAMBULE

Nous vous demandons de participer à un projet de recherche en neuroimagerie. Cependant, avant d'accepter de participer à ce projet de recherche, veuillez prendre le temps de lire, de comprendre et de considérer attentivement les renseignements qui suivent.

Le présent formulaire de consentement peut contenir des mots que vous ne comprenez pas. Nous vous invitons à poser toutes les questions que vous jugerez utiles au chercheur et aux autres membres du personnel affecté au projet de recherche et à leur demander de vous expliquer tout mot ou renseignement qui n'est pas clair.

QU'EST-CE QU'UNE RÉSONANCE MAGNÉTIQUE?

L'examen par résonance magnétique est une technique médicale qui donne des images de grande qualité du corps, du cerveau ainsi que de leur fonctionnement. Cette technique fait appel à une force naturelle présente autour de nous: le magnétisme. Ce champ magnétique intense est créé par un aimant.

La résonance magnétique permet également des examens par résonance magnétique fonctionnelle. Dans ce cas, l'appareil permet de voir les zones du cerveau qui deviennent actives lorsqu'on demande à une personne d'effectuer une tâche précise. Cette tâche peut être motrice, par exemple, lorsque l'on demande à la personne de bouger un doigt ou bien elle peut être cognitive, par exemple lorsque l'on demande à la personne d'effectuer un calcul mental, lire un mot ou encore regarder des photographies. Lorsqu'on demande à une personne d'effectuer une tâche, il y a 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 de résonance magnétique.

Pour l'examen d'imagerie par résonance magnétique, vous serez allongé sur un matelas qui sera lentement glissé dans un grand tube. Le tube est ouvert aux deux extrémités, il est muni d'une excellente aération et très bien éclairé. Un système d'interphone vous permettra de communiquer avec le technicien au besoin. Pour votre confort, on vous demandera de porter soit un casque d'écoute, soit des bouchons protecteurs qui seront installés dans vos oreilles, et ce, afin de diminuer les bruits importants qui sont émis par l'appareil. Pendant que l'appareil fonctionne, il est important que vous demeuriez immobile. Pour ce faire, un coussinet sera placé autour de votre tête afin d'assurer votre immobilité. Aucune substance ne vous sera injectée.

PRÉSENTATION DU PROJET DE RECHERCHE ET DE SES OBJECTIFS

Vous êtes invité à participer à un projet de recherche en neuroimagerie qui vise à identifier et à comprendre les mécanismes cérébraux qui sous-tendent l'apprentissage de concepts scientifiques particulièrement difficiles à acquérir.

Plus précisément, cette recherche vise à mieux comprendre les mécanismes cérébraux sous-tendant les processus de changement conceptuel en physique et en électricité en analysant l'activité cérébrale d'étudiants réalisant une tâche cognitive impliquant des circuits électriques et des balles en mouvement.

Trente étudiants seront recrutés pour participer à cette étude.

NATURE ET DURÉE DE VOTRE PARTICIPATION AU PROJET DE RECHERCHE

Ce projet de recherche se déroulera à l'Unité de Neuroimagerie Fonctionnelle de l'Institut universitaire de gériatrie de Montréal.

Votre participation à ce projet de recherche consistera à passer un examen d'imagerie par résonance magnétique tel que décrit précédemment. Pour cet examen nous vous demanderons d'effectuer certaines tâches qui nous permettront de capter les images de votre cerveau pendant que vous effectuerez ces tâches. La durée de ces tâches sera d'environ 60 minutes. La durée totale de votre participation à ce projet de recherche sera d'environ 2 heures, ce qui inclut les étapes préparatoires à l'examen d'imagerie par résonance magnétique.

• Description des tâches

Votre tâche cognitive consistera à déterminer, en appuyant sur l'un ou l'autre des boutons, si les films présentés sont en accord ou en désaccord avec ce à quoi vous vous attendez. Les films portent sur des balles en mouvement et des circuits électriques.

AVANTAGES POUVANT DÉCOULER DE VOTRE PARTICIPATION AU PROJET DE RECHERCHE

Il n'y a aucun avantage direct pouvant découler de votre participation au projet de recherche. Cependant, l'information recueillie permettra une meilleure compréhension de l'apprentissage en sciences.

INCONVÉNIENTS POUVANT DÉCOULER DE VOTRE PARTICIPATION AU PROJET DE RECHERCHE

Les conditions imposées par l'utilisation de l'imagerie par résonance magnétique peuvent entraîner un certain inconfort du fait de devoir rester immobile pendant l'examen et un inconfort pourrait également être associé au bruit que génère le fonctionnement de l'appareil. Vous pourriez aussi ressentir un certain stress ou une sensation de claustrophobie.

RISQUES POUVANT DÉCOULER DE VOTRE PARTICIPATION AU PROJET DE RECHERCHE

Selon les connaissances actuelles, votre participation à un examen d'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle ne vous fera courir, sur le plan médical, aucun risque si vous ne présentez aucune contre-indication.

Par ailleurs, à cause de la puissance de ce 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 à la passation de cet examen tels que, 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 aiguë. Les femmes enceintes et celles qui allaitent ne devraient pas passer un examen d'imagerie par résonance magnétique (voir questionnaire en annexe).

La vérification rigoureuse de la présence de contre-indication sera assumée par le technologue en fonction à l'Unité de Neuroimagerie Fonctionnelle.

INDEMNISATION EN CAS DE PRÉJUDICE

Si, dans le cadre de votre participation à l'étude, vous deviez subir quelque préjudice que ce soit vous recevrez tous les soins médicaux nécessaires, sans frais de votre part.

En acceptant de participer à ce projet, vous ne renoncez à aucun de vos droits ni ne libérez les chercheurs, le commanditaire ou l'établissement de leur responsabilité civile et professionnelle.

COMPENSATION POUR VOTRE PARTICIPATION

Pour votre participation au projet de recherche, vous recevrez une image de votre cerveau.

INFORMATION CONCERNANT LE PROJET DE RECHERCHE

Nous répondrons à votre satisfaction à toute question que vous poserez à propos du projet de recherche auquel vous acceptez de participer.

REFUS OU RETRAIT DE VOTRE PARTICIPATION AU PROJET DE RECHERCHE

Il est entendu que votre participation au projet de recherche est tout à fait volontaire, et que vous restez à tout moment libre de mettre fin à celle-ci sans avoir ni à motiver votre décision ni à subir de préjudice de quelque nature que ce soit.

ARRÊT DU PROJET DE RECHERCHE PAR LE CHERCHEUR

Le projet de recherche peut être interrompu par le chercheur pour différents motifs ou certaines circonstances, par exemple, des contre-indications d'ordre éthique ultérieures, l'établissement de nouveaux critères de sélection auxquels le sujet ne répondrait plus.

RETOUR D'INFORMATION ET AUTORISATION DE TRANSMETTRE LES RÉSULTATS

Les scans de recherche ne font pas l'objet d'un examen neuroradiologique. Cependant, l'examen d'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle peut mettre en évidence des problèmes jusque-là ignorés. C'est pourquoi, en présence de toute particularité dans les scans, vous serez invité à passer un nouvel examen avec un appareil de 1.5 teslas pour vérification. Advenant, la confirmation d'une anomalie, un neurologue transmettra ces données à votre médecin traitant ou vous assurera un suivi.

J'autorise la personne responsable de ce projet de recherche à transmettre les résultats de mon évaluation à mon médecin traitant si l'examen révèle une condition nécessitant un suivi:

Oui Non

Nom et adresse de mon médecin traitant:

CONFIDENTIALITÉ

Durant votre participation à ce projet de recherche, le chercheur responsable du projet ainsi que son personnel recueilleront et consigneront dans un dossier de recherche les renseignements vous concernant. Seuls les renseignements nécessaires à la bonne conduite du projet de recherche seront recueillis.

Ces renseignements comprennent les résultats de tous les tests que vous aurez à subir lors de ce projet de recherche. Votre dossier comprend aussi d'autres renseignements tels que votre nom, votre sexe, votre date de naissance, votre origine ethnique, de même que la moyenne scolaire obtenue lors de vos cours au niveau collégial et au niveau universitaire.

Tous ces renseignements recueillis au cours du projet de recherche demeureront strictement confidentiels dans les limites prévues par la loi. Afin de préserver votre identité et la confidentialité de ces renseignements, vous ne serez identifié que par un numéro de code. La clé du code reliant votre nom à votre dossier de recherche sera conservée par le chercheur responsable du projet de recherche dans un lieu sécuritaire.

Le chercheur responsable utilisera les données du projet de recherche à des fins de recherche dans le but de répondre aux objectifs scientifiques du projet de recherche décrits dans le formulaire d'information et de consentement. Vos renseignements personnels seront détruits cinq ans après la fin du projet de recherche.

Les données du projet de recherche pourront être publiées dans des revues médicales ou partagées avec d'autres personnes lors de discussions scientifiques. Aucune publication ou communication scientifique ne renfermera quoi que ce soit qui puisse permettre de vous identifier.

À des fins de surveillance et de contrôle, votre dossier de recherche pourront être consultés par une personne mandatée par le comité mixte d'éthique de la recherche du Regroupement Neuroimagerie/Québec, par une personne mandatée par le ministre de la Santé et des Services sociaux ou par des organismes gouvernementaux mandatés par la loi. Toutes ces personnes et ces organismes adhèrent à une politique de confidentialité.

À des fins de protection, notamment afin de pouvoir communiquer avec vous rapidement, vos noms et prénoms, vos coordonnées et la date de début et de fin de votre participation au projet seront conservés pendant un an après la fin du projet dans un répertoire maintenu par le chercheur responsable.

Vous avez le droit de consulter votre dossier de recherche pour vérifier l'exactitude des renseignements recueillis aussi longtemps que le chercheur responsable du projet de recherche, l'établissement ou l'institution de recherche détiennent ces informations. Cependant, afin de préserver l'intégrité scientifique du projet de recherche, vous n'aurez accès à certaines de ces informations qu'une fois l'étude terminée.

FINANCEMENT

Pour effectuer cette recherche, le chercheur responsable du projet a reçu une subvention du Fonds québécois de la recherche sur la société et la culture (FQRSC). Les sommes reçues couvrent les frais reliés à cette recherche.

ACCÈS AUX CHERCHEURS

Si vous avez des questions concernant le projet de recherche ou si vous croyez que vous éprouvez un problème de santé relié à votre participation au projet de recherche, vous pouvez communiquer avec le chercheur responsable de l'étude, Patrice Potvin, au 514-987-3000, poste 1290.

PROCÉDURES EN CAS D'URGENCE MÉDICALE

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

EN CAS DE PLAINTE

Pour tout problème concernant les conditions dans lesquelles se déroule votre participation à ce projet, vous pouvez, après en avoir discuté avec la personne responsable du projet, faire part de vos préoccupations à la responsable des plaintes de l'Institut universitaire de gériatrie de Montréal à l'adresse suivante : Commissaire local aux plaintes et à la qualité des services, Institut universitaire de gériatrie de Montréal, 4565, chemin Queen-Mary, Montréal (Québec) H3W 1W5. Tél. : (514) 340-3517.

INFORMATION SUR LA SURVEILLANCE ÉTHIQUE

Le comité mixte d'éthique de la recherche du Regroupement Neuroimagerie/Québec a approuvé ce projet de recherche et s'assure du respect des règles éthiques durant tout le déroulement de la recherche. Pour toute information, vous pouvez rejoindre le secrétariat du Comité au numéro : (514) 340-2800, poste 3250. Ce projet a également reçu l'approbation du Comité institutionnel d'éthique de la recherche avec des êtres humains de l'Université du Québec à Montréal (CIÉR). Si vous désirez obtenir des informations sur les responsabilités des chercheurs au plan de l'éthique de la recherche ou formuler une plainte, vous pouvez exposer votre situation auprès du Président du CIÉR, Joseph Josy Lévy. Il peut être joint par courriel à levy.joseph_josy@uqam.ca ou au numéro 514-987-3000, poste 7753.

CONSENTEMENT DU PARTICIPANT

Je déclare avoir lu le présent formulaire de consentement, particulièrement quant à la nature de ma participation au projet de recherche et l'étendue des risques qui en découlent. Je reconnais qu'on m'a expliqué le projet, qu'on a répondu à toutes mes questions et qu'on m'a laissé le temps voulu pour prendre une décision.

Je consens librement et volontairement à participer à ce projet. On me remettra une copie signée du présent formulaire.

Nom du sujet

Signature du sujet

DÉCLARATION DU CHERCHEUR

Je, soussigné(e) _____, certifie :

Avoir expliqué au signataire intéressé les termes du présent formulaire, avoir répondu aux questions qu'il m'a posées à cet égard, avoir clairement indiqué qu'il reste à tout moment libre de mettre un terme à sa participation au projet de recherche décrit ci-dessus. Je lui remettrai une copie signée du présent formulaire de consentement.

Nom du chercheur ou de son représentant

Signature du chercheur ou de son représentant

Fait à _____, le _____.

**DÉPISTAGE PRÉLIMINAIRE POUR ÉTUDE D'IMAGERIE PAR
RÉSONANCE MAGNÉTIQUE (IRM)**

Veillez écrire en caractère d'imprimerie

Nom :	Prénom :
Date de naissance : (jour/mois/année)	Sexe : F <input type="checkbox"/> M <input type="checkbox"/> Poids : ___ kg ___ lbs Grandeur : ___ m ___ pl
Chercheur (e) / Projet :	Numéro d'identification :

Afin d'assurer la sécurité de toute personne accédant au territoire de l'UNF, il est très important que ce questionnaire soit complété correctement.

1. Avez-vous déjà subi une opération ?

	Non	oui	Si oui, veuillez préciser le type d'opération et la date :
Tête			
Thorax ou cœur			
Abdomen			
Bras, mains			
Jambes, pieds			
Colonne vertébrale			
Yeux			
Autres :			

2. Portez-vous :

	non	oui
Stimulateur cardiaque (Pace-maker) ?		
Électrodes épiscopiques ?		
Clip pour anévrisme cérébral ?		
Prothèse cochléaire ? Prothèse auditive ?		
Filtre ou cathéter dans un vaisseau sanguin ?		
Neurostimulateur ?		
Stimulateur électronique pour les os ?		
Prothèse valvulaire cardiaque ?		
Corps étrangers métalliques ? (ex: balles, fragments d'obus, éclats métalliques)		
Pompe à insuline implantée ?		
Prothèse orthopédique ? (ex: clou, vis, plaque)		
Membre (s) artificiel (s) ?		

RÉFÉRENCES

- Abimbola, I. O. (1988). The problem of terminology in the study of student conceptions in science. *Science Education*, 72, 175-184.
- Abrahams, I., Homer, M., Sharpe, R. et Zhou, M. (2015) A comparative cross-cultural study of the prevalence and nature of misconceptions in physics amongst English and Chinese undergraduate students. *Research in Science & Technological Education*, 33(1), 111-130. DOI: 10.1080/02635143.2014.987744
- Achim, A. M., Lepage, M. (2005). Episodic memory-related activation in schizophrenia: meta-analysis. *Br J Psychiatry*, 187, 500-9.
- Allan, K., Dolan, R. J., Fletcher, P. C. et Rugg, M. D. (2000). The Role of the Right Anterior Prefrontal Cortex in Episodic Retrieval. *NeuroImage*, 11, 217-227. DOI: 10.1006/nimg.2000.0531
- Andersson, B. (1986). The experiential gestalt of causation: A common core to pupils' preconceptions in science. *European Journal of Science Education*, 2, 155-171.
- Andersson, B. et Karqvist, C. (1983). How Swedish pupils, aged 12-15 years, understand light and its properties. *European journal of science education*, 5, 387-402.
- Anderson, C., Sheldon, T. et Dubay, J. (1990). The effects of instruction on college nonmajors' conceptions of respiration and photosynthesis. *Journal of Research in Science Teaching*, 27, 761-776.
- Andreasen, N. C., O'Leary, D. S., Arndt, S., Cizadlo, T., Hurtig, R., Watkins, G. L., Ponto, L. L. B. et Hichwa, R. D. (1995a). Short-term and long-term verbal memory: A positron emission tomography study. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, 92, 5111-5115.
- Andreasen, N. C., O'Leary, D. S., Arndt, S., Cizadlo, T., Hurtig, R., Watkins, G. L., Ponto, L. L. B. et Hichwa, R. D. (1995b). I. PET studies of memory: Novel and practiced free recall of complex narratives. *NeuroImage*, 2, 284-295.

- Andreasen, N. C., O'Leary, D. S., Cizadlo, T., Arndt, S., Rezai, K., Watkins, G. L., Ponto, L. L. B. et Hichwa, R. D. (1995c). PET studies of memory: novel versus practiced free recall of word lists. *Neuroimage*, 2, 296-305.
- Andreasen, N. C., O'Leary, D. S., Arndt, S., Cizadlo, T., Hurtig, R., Watkins, G. L., Boles Ponto, L. et Hichwa, R. D. (1996). Neural substrates of facial recognition. *Journal of Neuropsychiatry and Clinical Neurosciences*, 8, 139-149.
- Andrews-Hanna, J. R., Saxe, R. et Yarkoni, T. (2014). Contributions of episodic retrieval and mentalizing to autobiographical thought: Evidence from functional neuroimaging, resting-state connectivity, and fMRI meta-analyses. *NeuroImage*, 91, 324–335.
- Aron, A. R., Robbins, T. W. et Poldrack, R. A. (2004). Inhibition and the right inferior frontal cortex. *Trends Cogn Sci*, 8(4), 170-177. DOI: 10.1016/j.tics.2004.02.01 0
- Ashburner, J. et Friston, K. J. (2005). Unified segmentation. *NeuroImage*, 26(3), 839-851.
- Asoko, H. (2002). Developing conceptual understanding in primary science. *Cambridge Journal of Education*, 32(2), 153-164.
- Astolfi, J.-P., Peterfalvi, B. et Vérin, A. (2006). *Comment les enfants apprennent les sciences*. Paris: Retz.
- Atkin, K. (2013). The teaching of mechanics: some criticisms, and suggestions for a rational approach. *Phys. Education*, 50(1), 46-51.
- Atkinson, R. C. et Juola, J. F. (1974). Search and decision processes in recognition memory. Dans D. H. Krantz, R. C. Atkinson, R. D. Luce et P. Suppes (dir.), *Contemporary developments in mathematical psychology: Learning, memory and thinking* (p. 243–293). San Francisco: Freeman.
- Babai, R. et Amsterdamer, A. (2008). The persistence of solid and liquid naive conceptions: a reaction time study. *Journal of Science Education and Technology*, 17, 553-559.
- Babai, R., Brecher, T., Stavy, R. et Tirosh, D. (2006). Intuitive interference in probabilistic reasoning. *International Journal of Science and Mathematics Education*, 4, 627-639.

- Babai, R., Eidelman, R. et Stavy, R. (2012). Preactivation of inhibitory control mechanisms hinders intuitive reasoning. *International journal of science and mathematics education*, 10, 763-775.
- Babai, R., Levyadun, T., Stavy, R. et Tirosh, D. (2006) Intuitive rules in science and mathematics: a reaction time study. *International Journal of Mathematical Education in Science and Technology*, 37(8), 913-924. DOI: 10.1080/00207390 600794958
- Babai, R., Nattiv, L. et Stavy, R. (2016). Comparison of perimeters: improving students' performance by increasing the salience of the relevant variable. *ZDM Mathematics Education*, 48, 367–378. DOI: 10.1007/s11858-016-0766-z
- Babai, R., Sekal, R. et Stavy, R. (2010). Persistence of the intuitive conception of living things in adolescence. *Journal of Science Education and Technology*, 19, 20-26.
- Babai, R., Shalev, E. et Stavy, R. (2015). A warning intervention improves students' ability to overcome intuitive interference. *ZDM Mathematics Education*, 47, 735–745.
- Baddeley, A. (2000). The episodic buffer: a new component of working memory? *Trends in Cognitive Sciences*, 4(11), 417-423.
- Baillargeon, N. (2010). *Stéroïdes pour comprendre la philosophie*. Montréal, Québec: Amérik Média.
- Bandettini, P. A. et Cox, R. W. (2000). Event-related fMRI contrast when using constant interstimulus interval: Theory and experiment. *Magnetic Resonance in Medicine*, 43(4), 540-548.
- Barnett, M. et Morran, J. (2002). Addressing children's alternative frameworks of the Moon's phases and eclipses. *International Journal of Science Education*, 24(8), 859-879. DOI: 10.1080/09500690110095276
- Bartels, A. et Zeki, S. (2015). The chronoarchitecture of the cerebral cortex. *Phil. Trans. R. Soc. B*, 360, 733–750. DOI: 10.1098/rstb.2005.1627
- Battro, A. M., Fischer, K. W. et Lena, P. J. (2008). *The educated brain: Essays in neuroeducation*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Bauman, R. et Adams, S. (1990). Misunderstandings of electric current. *Physics teacher*, 28, 334.

- Bélangier, M. (2008). *Du changement conceptuel à la complexification conceptuelle dans l'apprentissage des sciences*. (Thèse de doctorat, Université de Montréal, Québec). Récupéré de <https://papyrus.bib.umontreal.ca/xmlui/handle/1866/6487>
- Bélangier, M. (2011). *Les conceptions des étudiants en physique: comparaison entre deux domaines*. Communication présentée au Colloque de l'Association Québécoise de pédagogie collégiale, Université du Québec à Rimouski, Rimouski, Québec.
- Berger, H. (1929). Über das elektrenkephalogramm des menschen. *European Archives of Psychiatry and Clinicat Neuroscience*, 87(1), 527-570.
- Bernbach, H. A. (1967). Stimulus learning and recognition in paired-associate learning. *Journal of Experimental Psychology*, 75, 513-519.
- Bêty, M.-N. (2009). *Les principaux modèles de changement conceptuel et l'enseignement des sciences au primaire : état de la question*. (Mémoire de maîtrise, Université de Montréal, Montréal, Québec). Récupéré de <https://papyrus.bib.umontreal.ca/xmlui/handle/1866/8003>
- Bêty, M.-N. (2013). *Conception et mise à l'essai d'un dispositif de formation portant sur le changement conceptuel en électricité et destiné aux enseignants du primaire* (Thèse de doctorat, Université du Québec à Montréal, Montréal, Québec). Récupéré de <http://www.archipel.uqam.ca/5904/>
- Birn, R. M., Diamond, J. B., Smith, M. A. et Bandettini, P. (2006). Separating respiratory-variation related fluctuations from neuronal-activity-related fluctuations in fMRI. *Neuroimage*, 31, 1536–1548. DOI: 10.1016/j.neuroimage.2006.02.048
- Birn, R. M., Murphy, K., Handwerker, D. A. et Bandettini, P. (2009). fMRI in the presence of task correlated breathing variations. *Neuroimage*, 47, 1092–1104. DOI: 10.1016/j.neuroimage.2009.05.030
- Blandini, F., Nappi, G., Tassorelli, C. et Martignoni, E. (2000). Functional changes of the basal ganglia circuitry in Parkinson's disease. *Progress in Neurobiology*, 62, 63-88.
- Blanke, O., Mohr, C., Michel, C. M., Pascual-Leone, A., Brugger, P., Seeck, M., ... Thut, G. (2005). Linking out-of-body experience and self processing to mental own-body imagery at the temporoparietal junction. *The Journal of Neuroscience*, 25, 550–557. DOI: 10.1523/JNEUROSCI.2612-04.2005

- Bonni, S., Veniero, D., Mastropasqua, C., Ponzo, V., Caltagirone, C., Bozzali, M. et Koch, G. (2015). TMS evidence for a selective role of the precuneus in source memory retrieval. *Behavioural Brain Research*, 282, 70–75. Récupéré de <http://dx.doi.org/10.1016/j.bbr.2014.12.032>
- Borst, G., Pineau, A., Poirel, N., Cassotti, M. et Houdé, O. (2013). Inhibitory control efficiency in a Piaget-like class-inclusion task in school-age children and adults: a developmental negative priming study. *Dev. Psychol.*, 49, 1366–1374. DOI: 10.1037/a0029622
- Botvinick, M. (2007). Conflict monitoring and decision making: Reconciling two perspectives on anterior cingulate function. *Cogn Affect Behav Neurosci*, 7 (4), 356–66.
- Botvinick, M., Braver, T., Barch, D., Carter, C. et Cohen, J. (2001). Conflict monitoring and cognitive control. *Psychological Review*, 108, 625–652.
- Botvinick M, Cohen, J. D. et Carter, C. S. (2004). Conflict monitoring and anterior cingulate cortex: an update. *Trends Cogn. Sci.*, 8(12), 539–46.
- Bouveyron, C. (2002). Analyse des Images d'IRMf : Modélisation de la réponse hémodynamique et utilisation des séries de Volterra pour le traitement des corrélations temporelles (Mémoire de maîtrise, Université de Lyon, Lyon, France). Récupéré de http://lear.inrialpes.fr/~bouveyron/work/memoire_dess.pdf
- Bradley, M. M., Costa, V. D., Ferrari, V., Codispoti, M., Fitzsimmons, J. R. et Lang, P. J. (2014). Imaging distributed and massed repetitions of natural scenes: spontaneous retrieval and maintenance. *Human Brain Mapping*, 36, 1381–1392.
- Brault Foisy, L.-M. (2013). *Comparaison de l'activité cérébrale de novices et d'experts en sciences lors de la réalisation d'une tâche en physique mécanique impliquant une conception fréquente* (Mémoire de maîtrise, Université du Québec à Montréal, Montréal, Québec). Récupéré de <http://www.archipel.uqam.ca/6120/1/M13148.pdf>
- 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, 26–36.
- Braver, T. S., Reynolds, J. R. et Donaldson, D. I. (2003). Neural Mechanisms of Transient and Sustained Cognitive Control during Task Switching. *Neuron*, 39, 713–726.

- Brewer, W. F. (1999). Scientific Theories and Naive Theories as Forms of Mental Representation: Psychologism Revived. *Science and Education*, 8, 489-505.
- Brewer, W. F. et Vosniadou, S. (1994). Mental models of the day/night cycle. *Cognitive science*, 18, 123-183
- Brown, D. E. et Hammer, D. (2008). Conceptual change in physics. Dans S. Vosniadou (dir.), *International handbook of research on conceptual change* (p. 127-154). New York, NY: Routledge.
- Bryan, R. R., Glynn, S. M. et Kittleson, J. M. (2011). Motivation, Achievement, and Advanced Placement Intent of High School Students Learning Science. *Science education*, 95, 6, 1049-1065. DOI: 10.1002/sci.20462
- Bryce, D., Szűcs, D., Soltész, F. et Whitebread, D. (2011). The development of inhibitory control: An averaged and single-trial Lateralized Readiness Potential study. *NeuroImage*, 57, 671–685. DOI: 10.1016/j.neuroimage.2010.12.006
- Buchsbaum, B. R., Greer, S., Chang, W. L et Berman, K. F. (2005). Meta-Analysis of Neuroimaging Studies of the Wisconsin Card-Sorting Task and Component Processes. *Human Brain Mapping*, 25, 35– 45. DOI: 10.1016/j.neuroimage.2006.05.063
- Buckner, R. L. (1998). Event-related fMRI and the hemodynamic response. *Human Brain Mapping*, 6(5-6), 373-377.
- Buckner, R. L., Koutstaal, W., Schacter, D. L., Wagner, A. D. et Rosen, B. R. (1998). Functional–Anatomic Study of Episodic Retrieval Using Fmri. *NeuroImage*, 7, 151–162.
- Buckner, R. L., Petersen, S. E., Ojemann, J. G., Miezin, F. M., Squire, L. R. et Raichle, M. E. (1995). Functional anatomical studies of explicit and implicit memory retrieval tasks. *Journal of Neuroscience*, 15(1 Pt 1), 12-29.
- Burgess, P. W., Gilbert, S. J. et Dumontheil, I. (2007). Function and localization within rostral prefrontal cortex (area 10). *Phil. Trans. R. Soc. B*, 362, 887–899. DOI: 10.1098/rstb.2007.2095
- Burgess, P.W., Gilbert, S. J., Okuda, J. et Simons, J. S. (2006). Rostral prefrontal brain regions (area 10): a gateway between inner thought and the external world? Dans W. Prinz et N. Sebanz (dir.), *Disorders of volition* (p. 373–396). Cambridge, MA: MIT Press.

- Burgess, P. W., Simons, J. S., Dumontheil, I. et Gilbert, S. J. (2005) The gateway hypothesis of rostral PFC function. Dans J. Duncan, L. Phillips et P. McLeod (dir.), *Measuring the mind: speed, control and age* (p. 215–246). Oxford, UK: Oxford University Press.
- Burgoon, J. N., Heddle, M. L. et Duran, E. (2010). Re-Examining the Similarities Between Teacher and Student Conceptions About Physical Science. *J Sci Teacher Educ*, 21, 859–872. DOI: 10.1007/s10972-009-9177-0.
- Burle, B., Spieser, L., Roger, C., Casini, L., Hasbroucq, T. et Vidal, F. (2015). Spatial and temporal resolutions of EEG: Is it really black and white? A scalp current density view. *International Journal of Psychophysiology*, 97, 210–220.
- Bush G., Paul, J., Whalen, P. J., Rosen, B., 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. *Hum Brain Mapp*, 6, 270–82.
- Cabeza, R. (2008). Role of posterior parietal regions in episodic memory retrieval: the dual attentional processes hypothesis. *Neuropsychologia*, 46, 1813–1827
- Cabeza, R., Ciaramelli, E., Olson, I. R. et Moscovitch, M. (2008). Parietal Cortex and Episodic Memory: An Attentional Account. *Nat. Rev. Neurosci.*, 9(8), 613–625. DOI: 10.1038/nrn2459.
- Cabeza, R. et Nyberg, L. (2000). Imagine Cognition II: An Empirical Review of 275 PET and fMRI Studies. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 12(1), 1–47.
- Cabeza, R., Rao, S. M., Wagner, A. D., Mayer, A. R. et Schacter, D. L. (2001). Can medial temporal lobe regions distinguish true from false? An event-related functional MRI study of veridical and illusory recognition memory. *Proc. Nat. Acad. Sc. USA*, 98(8), 4805–4810.
- Cahill L. (2006). Why sex matters for neuroscience. *Nat Rev Neurosci*, 7(6), 477–84.
- Caillot, M. et Nguyen-Xuan, A. (1995). Adults' understanding of electricity. *Public Understanding of Science*, 4, 131–151.
- Callan, D. E. et Schweighofer, N. (2010). Neural correlates of the spacing effect in explicit verbal semantic encoding support the deficient-processing theory. *Human Brain Mapping*, 31, 645–659.

- Caramazza, A., McCloskey, M., & Green, B. (1981). Naive beliefs in 'sophisticated' subjects: Misconceptions about the trajectories of objects. *Cognition*, 9, 117-123.
- Caravita, S et Halldén, O. (1994). Re-framing the problem of conceptual change. *Learning and Instruction*, 4(1), 89-111. DOI: 10.1016/0959-4752(94)90020-5
- Carey, S. (1985a). *Conceptual change in childhood*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Carey, S. (1985b). *On some relations on children's conceptions between matter and weight*. Unpublished manuscript.
- Carey, S. (1999). Knowledge acquisition: enrichment or conceptual change? Dans E. Margolis et S. Laurence (dir.), *Concepts: Core Readings* (p. 459-487). Cambridge, MA : MIT Press.
- Carey, S. (2000). Science Education as Conceptual Change. *Journal of Applied Developmental Psychology*, 21(1), 13.
- Carey, S. (2004). Core Concepts [titre de présentation]. Cognitive Development, Education, and the Brain [titre du cours], présentation faite dans le cadre du cours HT100 à la Faculté Harvard Graduate School of Education, Cambridge, MA.
- Carey, S. (2011). Précis of The Origin of Concepts. *Behavioral and Brain Sciences*, 34, 113–167. DOI: 10.1017/S0140525X10000919
- Carlton, K. (1999). Teaching electric current and electrical potential. *Physics Education*, 34(6), 341-345.
- Carruthers, P., Stich, S. P. et Siegal, M. (2002). *The cognitive basis of science*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Carter, C. S., Lesh, T. A. et Barch, D. M. (2016). Thresholds, power, and sample sizes in clinical neuroimaging. *Biol. Psychiatry*, 1, 99–100.
- Caruana, E. J., Roman, M., Hernández-Sánchez, J. et Solli, P. (2015). Longitudinal studies. *J Thorac Dis*, 7(11), E537-E540. DOI: 10.3978/j.issn.20721439.2015.10.63
- Cavanna, A. E. et Trimble, M. R. (2006). The precuneus: a review of its functional anatomy and behavioural correlates. *Brain*, 129, 564–583. DOI: 10.1093/brain/aw1004

- Caza, N., McAndrews, M. P., Hoque, T., Ziegler, M., Crawley, M. et Moscovitch, M. (2004). Neural basis for remembering and knowing in associative memory. Communication présentée à une conférence portant sur la neuroscience cognitive, Montréal, Québec (Juillet 2004).
- Cepni, S. et Keles, E. (2006). Turkish students' conceptions about the simple electric circuits. *International Journal of Science and Mathematics Education*, 4, 269-291.
- Champagne, A., Gunstone, R. et Klopfer, L. (1985). Effecting changes in cognitive structures among physics students. Dans L. H. T. West et A. L. Pines (dir.), *Cognitive structure and conceptual change* (p.163-187). New York: Academic Press.
- Chee, M. W. L., Goh, J. O. S., Lim, Y., Graham, S. et Lee, K. (2004). Recognition memory for studied words is determined by cortical activation differences at encoding but not during retrieval. *NeuroImage*, 22, 1456-1465.
- Chee, M. W. L., Westphal, C., Goh, J., Graham, S. et Song, A. W. (2003). Word frequency and subsequent memory effects studied using event-related fMRI. *NeuroImage*, 20, 1042-1051.
- Chi, M. (1992). Conceptual change in and across ontological categories: examples for learning and discovery in science. Dans R. N. Giere (dir.), *Cognitive models of science* (p. 129-160). Minneapolis, Min.: University of Minneapolis Press.
- Chi, M. T. H. (2008). Three types of conceptual change: Belief revision, mental model transformation, and categorical shift. Dans S. Vosniadou (dir.), *Handbook of research on conceptual change* (p. 61-82). Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- Chi, M. T. H., de Leeuw, N., Chiu, M.-H. et Lavancher, C. (1994). Eliciting Self-Explanations Improves Understanding. *Cognitive Science*, 18, 439-477.
- Chi, M. T. H. et Roscoe, R. D. (2002). The processes and challenges of conceptual change. Dans L. Limon et L. Mason (dir.), *Reconsidering conceptual change: Issues in theory and practice* (p.3-27). Amsterdam, Pays-Bas: Kluwer Academic Publishers.
- Chi, M. T. H., Slotta, J. D. et de Leeuw, N. (1994). From things to processes: a theory of conceptual change for learning science concepts. *Learning and Instruction*, 4, 27-43.

- Chinn, C. A. et Brewer, W. F. (1993). The Role of Anomalous Data in Knowledge Acquisition: A Theoretical Framework and Implications for Science Instruction. *Review of Educational Research*, 63(1), 1-49.
- Chiu, M.-H. (2015). *Science education research and practices in Taiwan: challenges and opportunities*. Springer.
- Ciaramelli, E., Grady, C., Levine, B., Ween, J. et Moscovitch, M. (2010) Top-down and bottom-up attention to memory are dissociated in posterior parietal cortex: neuroimaging and neuropsychological evidence. *J. Neurosci.*, 30, 4943–4956.
- Ciaramelli, E., Grady, C. et Moscovitch, M. (2008) Top-down and bottom-up attention to memory: a hypothesis (AtoM) on the role of the posterior parietal cortex in memory retrieval. *Neuropsychologia*, 46, 1828–1851
- Clement, J. (1982). Students' preconceptions in introductory mechanics. *American Journal of Physics*, 50, 66-71.
- Clement, J. (1988). Observed Methods for Generating Analogies in Scientific Problem Solving. *Cognitive Science*, 12, 563-586.
- Clement, J. (1993). Using bridging analogies and anchoring intuitions to deal with students' preconceptions in physics. *Journal of Research in Science Teaching*, 30(10), 1241-1257.
- Cohen, D. (1972). Magnetoencephalography: Detection of the Brain's Electrical Activity with a Superconducting Magnetometer. *Science*, 175(4022), 664-666.
- Cohen, O., Koppel, M., Malach, R. et Friedman, D. (2014). Controlling an avatar by thought using real-time fMRI. *J. Neural Eng.*, 11. DOI: 10.1088/17412560/11/3 /035006
- Collins, D. L., Zijdenbos, A. P., Baaré, W. F. C. et Evans, A. C. (1999). *ANIMAL+INSECT: improved cortical structure segmentation*. Dans Kuba, A., Samal, M. et Todd-Pokropek, A. (prés.), *Information Processing in Medical Imaging* (Vol. 1613, p. 210-223): 16th International Conference, IPMI'99, Visegrád, Hongrie.

- Conseil de la science et de la technologie. (2004). *La culture scientifique et technique, une interface entre les sciences, la technologie et la société* (Rapport de conjoncture 2004). Récupéré de <https://www.economie.gouv.qc.ca/fr/bibliotheques/etudes-analyses/donnees-et-analyses-sur-la-recherche-et-linnovation/conseil-de-la-science-et-de-la-technologie-cst/publications/publications-de-2000-a-2009/2004/rapport-rapport-de-conjoncture-2004-la-culture-scientifique-et-technique-une-interface-entre-les-sciences-la-technologies-et-la-societe/>
- Corbetta, M., Kincade, M. J., Lewis, C., Snyder, A. Z. et Sapir, A. (2005). Neural basis and recovery of spatial attention deficits in spatial neglect. *Nature Neuroscience*, 8(11), 1603-1610.
- Corbetta, M., Kincade, J. M., Ollinger, J. M., McAvoy, M. P. et Shulman, G. L. (2000). Voluntary orienting is dissociated from target detection in human posterior parietal cortex. *Nature Neuroscience*, 3, 292-297.
- Corbetta, M., Patel, G. et Shulman, G. L. (2008). The reorienting system of the human brain: from environment to theory of mind. *Neuron*, 58, 306-24.
- Corbetta, M. & Shulman, G. L. (2002). Control of goal-directed and stimulus-driven attention in the brain. *Nature Reviews Neuroscience*, 3, 201-215.
- Cormier, C. (2014). *Étude des conceptions alternatives et des processus de raisonnement des étudiants de chimie du niveau collégial sur la molécule, la polarité et les phénomènes macroscopiques* (Thèse de doctorat, Université de Montréal, Québec, Canada). Récupéré de <https://papyrus.bib.umontreal.ca/xmlui/handle/1866/11916>
- Cox, D. D. et Savoy, R.L., 2003. Functional magnetic resonance imaging (fMRI) “brain reading”: detecting and classifying distributed patterns of fMRI activity in human visual cortex. *Neuroimage*, 19, 261-270.
- Criaud, M. et Boulinguez, P. (2013). Have we been asking the right questions when assessing response inhibition in go/no-go tasks with fMRI? A meta-analysis and critical review. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, 37, 11-23. Récupéré de <http://dx.doi.org/10.1016/j.neubiorev.2012.11.003>
- Daselaar, S. M., Fleck, M. S. et Cabeza, R. (2006). Triple dissociation in the medial temporal lobes: Recollection, familiarity, and novelty. *Journal of Neurophysiology*, 96, 1902-1911.
- Davies, D. J., Su, Z., Clancy, M. T., Lucas, S. J. E., Dehghani, H., Logan, A. et Belli, A. (2015). Near-infrared spectroscopy in the monitoring of adult traumatic

- brain injury: a review. *Journal of Neurotrauma*, 32, 933–941. DOI: 10.1089/neu.2014.3748
- Deary, I. J., Strand, S., Smith, P. et Fernandes, C. (2007). Intelligence and educational achievement. *Intelligence*, 35, 13–21.
- Dehghani, H., Eames, M. E., Yalavarthy, P. K., Davis, S. C., Srinivasan, S., Carpenter, C. M., Pogue, B. W. et Paulsen, K.D. (2008). Near infrared optical tomography using NIRFAST: algorithm for numerical model and image reconstruction. *Commun. Numer. Methods Eng.*, 25, 711–732. DOI: 10.1002/cnm.1162
- Dempster, F. N. et Corkill, A. J. (1999). Interference and Inhibition in Cognition and Behavior: Unifying Themes for Educational Psychology. *Educational Psychology Review*, 11(1), 1-88.
- De Neys, W., Vartanian, O. et Goel, V. (2008). Smarter than we think: when our brains detect that we are biased. *Psychological Science*, 19(5), 483-489. DOI: 10.1111/j.1467-9280.2008.02113.x
- Derrfuss, J., Brass, M., Neumann, J. et von Cramon D. Y. (2005). Involvement of the Inferior Frontal Junction in Cognitive Control: Meta-Analyses of Switching and Stroop Studies. *Human Brain Mapping*, 25, 22–34.
- Desgranges, B., Baron, J.-C. et Eustache, F. (1998). The Functional Neuroanatomy of Episodic Memory: The Role of the Frontal Lobes, the Hippocampal Formation, and Other Areas. *Neuroimage*, 8, 198–213.
- 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.
- de Vecchi, G. et Giordan, A. (1994). *L'enseignement scientifique. Comment faire pour que ça marche?* Nice : Z'édicions.
- Dewolf, T., Van Dooren, W., Cimen, E. E. et Verschaffel, L. (2014). The impact of illustrations and warnings on solving mathematical word problems realistically. *The Journal of Experimental Education*, 82, 103–120.
- de Zubicaray, G. I., McMahon, K. L., Eastburn, M. M., Finnigan, S. et Humphreys, M. S. (2005). fMRI evidence of word frequency and strength effects in recognition memory. *Cognitive Brain Research*, 24, 87 – 598.

- Diamond, A. (2005). Attention-deficit disorder (attention-deficit/hyperactivity disorder without hyperactivity): A neurobiologically and behaviorally distinct disorder from attention-deficit/hyperactivity disorder (with hyperactivity). *Dev Psychopathol.*, 17(3), 807–825.
- diSessa, A. A. (1982). Unlearning Aristotelian physics: a study of knowledge based learning. *Cognitive science*, 6, 37-75.
- diSessa, A. A. (1988). Knowledge in pieces. Dans G. Forman et P. B. Pufall (dir.), *Constructivism in the Computer Age* (p. 49-70). Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.
- diSessa, A. A. (1993). Toward an epistemology of physics. *Cognition and Instruction*, 10(2-3), 105-225.
- diSessa, A. A. (2002). Why "conceptual ecology" is a good idea. Dans M. Limon et L. Mason. (dir.), *Reconsidering conceptual change: Issues in theory and practice* (p. 29-60). Dordrecht, Pays-Bas: Kluwer Academic Publishers.
- diSessa, A. A. (2006). A history of conceptual change research: Threads and fault lines. Dans R. K. Sawyer (dir.), *Cambridge Handbook of the Learning Sciences* (p. 265-281). Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- diSessa, A. A. (2008). A bird's-eye view of the "pieces" vs. "coherence" controversy (from the "pieces" side of the fence). Dans S. Vosniadou (dir.), *International handbook of research on conceptual change* (p. 35-60). New York, NY: Routledge.
- diSessa, A. A. (2013). The Construction of Causal Schemes: Learning Mechanisms at the Knowledge Level. *Cognitive Science: A Multidisciplinary Journal*, 38(5), DOI: 10.1111/cogs.12131
- diSessa, A. A. (2014). The Construction of Causal Schemes: Learning Mechanisms at the Knowledge Level. *Cognitive Science*, 38, 795–850. DOI: 10.1111/cogs.12131.
- diSessa, A. A. et Sherin, B. L. (1998). What changes in conceptual change? *International Journal of Science Education*, 20(10), 1155-1191.
- Dobbins, I. G., Simons, J. S. et Schacter, D. L. (2004). fMRI Evidence for Separable and Lateralized Prefrontal Memory Monitoring Processes. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 16(6), 908–920.

- Dole, J. A. et Sinatra, G. M. (1998). Reconceptualizing change in the cognitive construction of knowledge. *Educational Psychologist*, 33(2/3), 109-128.
- Donders, F. C. (1868/1969). On the speed of mental processes. *Acta Psychologica*, 30, 412-431.
- Doran, R. L. (1972). Misconceptions of selected science concepts held by elementary school students. *Journal of Research in Science Teaching*, 9(2), 127-137.
- Driver, R., Squires, A., Rushworth, P. et Robinson, V. (1994). *Making sense of secondary science*. London, UK: Routledge.
- Driver, R. et Easley, J. (1978). Pupils and paradigms: A review of the literature related to concept development in adolescent science students. *Studies in Science Education*, 5, 61-84.
- Dudukovic, N. M. et Knowlton, B. J. (2006). Remember-Know judgments and retrieval of contextual details. *Acta Psychologica*, 122, 160-173.
- Duffy, G., Sorby, S. et Bowe, B. (2016). *Visualizing Electric Circuits: The Role of Spatial Visualization Skills in Electrical Engineering*. Récupéré de <http://commons.erau.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1011&context=asee-edgd>
- Duit, R. (1999) Conceptual change approaches in science education. Dans W. Schnotz, S. Vosniadou et M. Carretero (dir.), *New perspectives on conceptual change* (p. 263-282). Amsterdam, Pays-Bas: Pergamon.
- Duit, R. (2009). *Bibliography - Students' and Teachers' Conceptions and Science Education*. Récupéré de <http://archiv.ipn.uni-kiel.de/stcse/>
- Duit, R. et Treagust, D. F. (2003). Conceptual change: A powerful framework for improving science teaching and learning. *International Journal of Science Education*, 25(6), 671-688.
- Dunbar, K. N., Fugelsang, J. A. et Stein, C. (2007). Do naïve theories ever go away? Using brain and behavior to understand changes in concepts. Dans M. C. Lovett et P. Shah (prés.), *Thinking with Data: 33rd Carnegie Symposium on Cognition* (p. 193-206). Mahwah, NJ: Erlbaum.
- Duncan, J. et Owen, A. M. (2000). Common regions of the human frontal lobe recruited by diverse cognitive demands. *Trends Neurosci.*, 23, 475-483.

- Düzel, E., Cabeza, R., Picton, T. W., Yonelinas, A. P., Scheich, H. Heinze, H.-J. et Tulving, E. (1999). Task-related and item-related brain processes of memory retrieval. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.*, 96, 1794–1799.
- Dykstra, D. I., Boyle, C. F. et Monarch, I. A. (1992). Studying conceptual change in learning physics. *Science Education*, 76(6), 615-652.
- Eickhoff, S. B., Heim, S., Zilles, K. et Amunts, K. (2006). Testing anatomically specified hypotheses in functional imaging using cytoarchitectonic maps. *Neuroimage*, 32, 570–582.
- Eickhoff, S. B., Stephan, K. E., Mohlberg, H., Grefkes, C., Fink, G. R., Amunts, K. et Zilles, K. (2005). A new SPM toolbox for combining probabilistic cytoarchitectonic maps and functional imaging data. *NeuroImage* 1, 25(4), 1325– 1335.
- Eklund, A., Nichols, T. E. et Knutsson, H. (2016). Cluster failure: why fMRI inferences for spatial extent have inflated false-positive rates. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.*, 113, 7900–7905.
- Elliott, R. (2003). Executive functions and their disorders. *British Medical Bulletin*, 65, 49–59. DOI: 10.1093/bmb/ldg65.049
- Engel, E. et Driver, R. (1981). *Investigating pupils' understanding of aspects of pressure*. Affiche présentée dans le cadre d'un workshop international sur les représentations des étudiants, Ludwigsburh, Germany.
- Engelhardt, P. V. et Beichner, R. J. (2004). Students' understanding of direct current resistive electrical circuits. *Am. J. Phys.*, 72(1), 98-115.
- Erickson, G. (1979). Children's conceptions of heat and temperature. *Science education*, 63, 221-230.
- Erickson, G. (1980). Children's viewpoints of heat: a second look. *Science education*, 64, 323-336.
- Erickson, G. et Tiberghien, A. (1985). Heat and temepature. Dans R. Driver, E Guesne et A. Tiberghien (dir.), *Children's ideas in science* (p. 52-84). Londres: Milton Keynes.
- Erten, S. (2008). Interests of 5th through 10th grade students toward human biology. *Hacettepe University Journal of Education*, 35, 135–147.

- Eryilmaz, A. (2002). Effects of conceptual assignments and conceptual change discussions on students' misconceptions and achievement regarding force and motion. *Journal of Research in Science Teaching*, 39(10), 1001-1015. doi: 10.1002/tea.10054
- Etzel, J. A., Gazzola, V. et Keyzers, C. (2009). An introduction to anatomical ROI-based fMRI classification analysis. *Brain Research*, 1282, 114-125.
- European Commission. (2011). *Science Education in Europe: National Policies, Practices and Research*. Récupéré de http://eacea.ec.europa.eu/education/eurdydice/documents/thematic_reports/133en.pdf
- Evans, A. C., Janke, A. L., Collins, D. L. et Baillet, S. (2012). Brain templates and atlases. *NeuroImage*, 62, 911–922. DOI: 10.1016/j.neuroimage.2012.01.024
- Fan, L., Gau, S. S. et Chou, T. (2014). Neural correlates of inhibitory control and visual processing in youths with attention deficit hyperactivity disorder: a counting stroop functional MRI study. *Psychol. Med.*, 44, 2661–2671. DOI: 10.1017/S0033291714000038
- Fassbender, C., Murphy, K., Foxe, J. J., Wylie, G. R., Javitt, D. C., Robertson, I. H., et Garavan, H. (2004). A topography of executive functions and their interactions revealed by functional magnetic resonance imaging. *Cognitive Brain Research*, 20(2), 132–143.
- Ferrey, A. E., Frischen, A. et Fenske, M. J. (2012). Hot or not: response inhibition reduces the hedonic value and motivational incentive of sexual stimuli. *Frontiers in Psychology*, 3(Article 575), 1-7. DOI: 10.3389/fpsyg.2012.00575
- Fischer, K. W. (2009). Mind, brain, and education: Building a scientific groundwork for learning and teaching. *Mind, Brain, and Education*, 3(1), 3-16.
- Fischer, K. W., Daniel, D. B., Immordino-Yang, M. H., Stem, E., Battro, A. et Koizumi, H. (2007). Why mind, brain, and education? Why now? *Mind, Brain, and Education*, 1(1), 1-2.
- Fischl, B., van der Kouwe, A., Destrieux, C., Halgren, E., Ségonne, F., Salat, D. H., ... Dale, A. M. (2004). Automatically parcellating the human cerebral cortex. *Cereb Cortex*, 14(1), 11-22.
- Fisher, K. (1983). Amino acids and translation: A misconception in biology. Dans H. Helm et J. Novak (prés.), *Proceedings of the International Seminar on Misconceptions in Science and Mathematics* (p. 407-419). Ithaca, NY: Department of Education, Cornell University.

- Fisher, K. et Lipson, J. (1986). Twenty questions about student errors. *Journal of Research in Science Teaching*, 23, 783-803.
- Fletcher, P. C., Frith, C. D., Baker, S. C., Shallice, T., Frackowiak, R. S., Dolan et R. J. (1995). The mind's eye-precuneus activation in memory-related imagery. *Neuroimage*, 3, 195-200.
- Fletcher, P. C., Frith, C. D. et Rugg, M. D. (1997). The functional neuroanatomy of episodic memory. *Trends Neurosci.*, 20, 213–218.
- Fletcher, P. C. et Henson, R. N. A. (2001). Frontal lobes and human memory: insights from functional neuroimaging. *Brain*, 124, 849–881.
- Fletcher, P. C., Shallice, T., Frith, C. D., Frackowiak, R. S. J. et Dolan, R. J. (1996). Brain activity during memory retrieval: The influence of imagery and semantic cuing. *Brain*, 119, 1587-1596.
- Fliessbach, K., Weis, S., Klaver, P., Elger, C. E. et Weber, B. (2006). The effect of word concreteness on recognition memory. *NeuroImage*, 32, 1413–1421.
- Foerde, K. et Shohamy, D. (2011). The role of the basal ganglia in learning and memory: Insight from Parkinson's disease. *Neurobiol Learn Mem.*, 96(4), 624–636. DOI: 10.1016/j.nlm.2011.08.006.
- Fortin, M.-F. (2010). *Fondements et étapes du processus de recherche* (2e édition). Montréal, Québec: Chenelière education.
- Fredette, N. et Clement, J. (1981). Student misconceptions of an electric current: What do they mean? *Journal of College Science Teaching*, 10, 280-285.
- Friedman, N. P. et Miyake, A. (2004). The Relations among Inhibition and Interference Control Functions: A Latent-Variable Analysis. *Journal of Experimental Psychology: General*, 133, 101-135. Récupéré de <http://dx.doi.org/10.1037/00963445.133.1.101>
- Frings, L., Wagner, K., Quiske, A., Schwarzwald, R., Spreer, J., Halsband, U. et Schulze-Bonhage, A. (2006). Precuneus is involved in allocentric spatial location encoding and recognition. *Exp Brain Res*, 173, 661–672. DOI: 10.1007/s00221-006-0408-8
- Friston, K. J., Holmes, A. P., Worsley, K. J., Poline, J. P., Frith, C. D. et Frackowiak, R. S. J. (1995). Statistical parametric maps in functional imaging: a general linear approach. *Human Brain Mapping*, 2(4), 189-210. DOI: 10.1002/hbm.460 020402

- Friston, K.J., Rotshtein, P., Geng, J.J., Sterzer, P., Henson, R.N. (2006). A critique of functional localisers. *Neuroimage*, 30, 1077–87.
- Friston, K. J., 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.
- Fugelsang, J. A. et Dunbar, K. N. (2005). Brain-based mechanisms underlying complexcausal thinking. *Neuropsychologia*, 43, 1204–1213. DOI: 10.1016/j.neuropsychologia.2004.10.012
- Funahashi, S. (2001). Neuronal mechanisms of executive control by the prefrontal cortex. *Neuroscience Research*, 39, 147–165.
- Furio, C. et Guisasola, J. (1998). Difficulties in learning the concept of electric field. *Instructional Science Education*, 82, 511-526.
- Gallistel, C. R., Brown, A. L., Carey, S., Gelman, R. et Keil, F. C. (2014). Lessons from animal learning for the study of cognitive development. Dans S. carey et R. Gelman (dir.), *The epigenesis of mind: essays on biology and cognition* (p. 261-292). Psychology Press Ltd.
- Galvin, E., Simmie, G. M. et O’Grady, A. (2015). Identification of Misconceptions in the Teaching of Biology: A Pedagogical Cycle of Recognition, Reduction and Removal. *Higher Education of Social Science*, 8(2), 1-8. DOI: <http://dx.doi.org/10.3968/6519>
- Garavan, H., Ross, T. J., Murphy, K., Roche, R. A. P et Stein, E. A. (2002). Dissociable Executive Functions in the Dynamic Control of Behavior: Inhibition, Error Detection, and Correction. *NeuroImage*, 17, 1820–1829. DOI: 10.1006/nimg.2002.1326
- Gaudreau, L. (2011). *Guide pratique pour créer et évaluer une recherche scientifique en éducation*. Montréal, Québec: Guérin.
- Gawryluk, J. R., Mazerolle, E. L. et D’Arcy, R. C. N. (2014). Does functional MRI detect activation in white matter? A review of emerging evidence, issues, and future directions. *Frontiers in Neuroscience*, 8(239), 1-12. DOI: 10.3389/fnins.2014.00239
- Gazzinga, M. S. (1992). *Nature’s mind*. New York: Basic Books.

- Geake, J. G. (2003). Adapting middle level educational practices to current research on brain functioning. *Journal of the New England League of Middle Schools*, 15(2), 6-12.
- Geake, J. G. (2004). Cognitive neuroscience and education: Two-way traffic or one-way street? *Westminster Studies in Education*, 27(1), 87- 98.
- Geake, J. G. (2011). Position statement on motivations, methodologies, and practical implications of educational neuroscience research: fMRI studies of the neural correlates of creative intelligence. *Educational philosophy and theory*, 43(1), 43-47.
- Geake, J. et Cooper, P. (2003). Cognitive neuroscience: Implications for education. *Westminster Studies in Education*, 26(1), 7-20.
- George, R. (2006). A Cross-domain Analysis of Change in Students' Attitudes toward Science and Attitudes about the Utility of Science. *International Journal of Science Education*, 28(6), 571-589. DOI: 10.1080/09500690500338755
- Gilbert, S. J., Spengler, S., Simons, J. S., Steele, D. J., Lawrie, S. M., Frith, C. D. et Burgess, P. W. (2006). Functional Specialization within Rostral Prefrontal Cortex (Area 10): A Meta-analysis. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 18(6), 932-948.
- Gilbert, J. et Swift, D. (1985). Towards a Lakatosian analysis of the Piagetian and alternative conceptions research programs. *Science Education*, 69, 681-696.
- Gilboa, A., Winocur, G., Grady, C. L., Hevenor, S. J. et Moscovitch, M. (2004). Remembering our past: Functional neuroanatomy of recollection of recent and very remote personal events. *Cerebral Cortex*, 14, 1214-1225.
- Gilliéron, C. (1996). L'émergence d'un constructivisme psychologique: Épistémologie génétique et étude du développement. *Anuario de Psicología*, 69, 19-41.
- Giordan, A. (1989). Vers un modèle didactique d'apprentissage allostérique. Dans Bednarz, N. et Garnier, C. (Dir.) *Construction des savoirs : obstacles et conflits*. Montréal : Éditions Agence d'ARC, p.240-257.
- Giordan, A. (1998). *Apprendre!* Paris: Éditions Belin.

- Giordan, A. (2002). Après Piaget, que peut-on dire sur le changement conceptuel. Dans R. M. J. Toussaint (Dir.), *Changement conceptuel et apprentissage des sciences, recherches et pratiques* (p. 13-29). Montréal : Éditions Logiques.
- Giordan, A. et de Vecchi, G. (1987). *Les origines du savoir: des conceptions des apprenants aux concepts scientifiques*. Suisse : Éditions Delachaux et Niestlé.
- Glover, G. H. (2011). Overview of Functional Magnetic Resonance Imaging. *Neurosurg Clin N Am.*, 22(2), 133–139. DOI: 10.1016/j.nec.2010.11.001
- Goebel, R. (2014). Statistical analysis and modeling of functional MRI data. Dans C. Mulert et M. E. Shenton (dir.), *MRI in Psychiatry* (p. 3-34). DOI: 10.1007/978-3-642-54542-9
- Gomez-Swiep, S. (2008). Elementary Teachers' Understanding of Students' Science Misconceptions: Implications for Practice and Teacher Education. *J Sci Teacher Educ*, 19, 437–454. DOI: 10.1007/s10972-008-9102-y.
- González-Espada, W. J., Birriel, J. et Birriel, I. (2010). Discrepant Events: A Challenge to Students' Intuition. *The Physics Teacher*, 48, 508-511. DOI: 10.1119/1.3502 499
- Grabner, R. H., Ansari, D., Reishofer, G., Stern, E., Ebner, F., & Neuper, C. (2007). Individual differences in mathematical competence predict parietal brain activation during mental calculation. *NeuroImage*, 38(2), 346–356.
- Grabner, R. H., Fink, A., Stipacek, A., Neuper, C. et Neubauer, A.C. (2004). Intelligence and working memory systems: evidence of neural efficiency in alpha band ERD. *Cogn. Brain Res.*, 20(2), 212–225.
- Grady, C. L. (1999). Neuroimaging and activation of the frontal lobes. Dans B. L. Miller et J. L. Cummings (dir.), *The human frontal lobes: function and disorders* (p. 196–230). New York, NY: Guilford Press Grant.
- Grasby, P. M., Frith, C. D., Friston, K. J., Bench, C., Frackowiak, R. S. J. et Dolan, R. J. (1993a). Functional mapping of brain areas implicated in auditory–verbal memory function. *Brain*, 116, 1–20.
- Grasby, P. M., Frith, C. D., Friston, K., Frackowiak, R. S. J. et Dolan, R. J. (1993b). Activation of the human hippocampal formation during auditory–verbal long-term memory function. *Neurosci. Lett.*, 163, 185–188.
- Guisasola, J., Zubimendi, J. L., Almudi, J. M. et Ceberio, M. (2002). The evolution of the concept of capacitance throughout the development of the electric theory

- and the understanding of its meaning by university students. *Science & Education*, 11, 247-261.
- Güngör, A., Eryılmaz, A. et Fakioglu, T. (2007). The relationship of freshmen's physics achievement and their related affective characteristics. *Journal of Research in Science Teaching*, 44(8), 1036–1056.
- Gunstone, R. F. (1987). Student Understanding in Mechanics: A Large Population Survey. *Am. J. Phys.*, 55(8), 691-696.
- Gunstone, R. F. et White, R. (1981). Understanding of gravity. *Science Education*, 65, 291-299.
- Halsband, U., Krause, B. J., Schmidt, D., Herzog, H., Tellmann, L. et Muller-Gartner, H.-W. (1998). Encoding and retrieval in declarative learning: A positron emission tomography study. *Behavioural Brain Research*, 97, 69-78.
- Hammers, A., Allom, R., Koepf, M. J., Free, S. L., Myers, R., Lemieux, L., ... Duncan, J. S. (2003). Three-dimensional maximum probability atlas of the human brain, with particular reference to the temporal lobe. *Hum. Brain Mapp.*, 19, 224–247.
- Harrison, A. G. et Treagust, D. F. (2000). Learning about Atoms, Molecules, and Chemical Bonds: A Case Study of Multiple-Model Use in Grade 11 Chemistry. *Science Education*, 84, 352–381.
- Hashweh, M. (1988). Descriptive studies of students' conceptions in science. *Journal of Research in Science Teaching*, 25, 121-134.
- Hasni, A. et Potvin, P. (2015). *L'intérêt pour la science et la technologie à l'école: Résultats d'une enquête auprès d'élèves du primaire et du secondaire au Québec*. Récupéré de <http://www.crijest.org/sites/crijest.org/files/HasniPotvin-Rapport-CRIJEST-2005-VF.pdf>
- Haxby, J. V., Ungerleider, L. G., Horwitz, B., Maisog, J. M., Rapoport, S. I. et Grady, C. L. (1996). Face encoding and recognition in the human brain. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 93, 922-927.
- Hayasaka, S. et Nichols, T. E. (2003). Validating cluster size inference: random field and per-mutation methods. *NeuroImage*, 20, 2343–56. Récupéré de <http://dx.doi.org/10.1016/j.neuroimage.2003.08.003>.
- Hayasaka, S., Nichols, T. E. (2004). Combining voxel intensity and cluster extent with permutation test framework. *NeuroImage*, 23, 54–63.

- Hayasaka, S., Phan, K. L., Liberzon, I., Worsley, K. J. et Nichols, T. E. (2003). Nonstationary cluster-size inference with random field and permutation methods. *NeuroImage*, 22, 676–87. Récupéré de <http://dx.doi.org/10.1016/j.neuroimage.2004.01.041>.
- Heimer, L., Zahm, D. S. et Alheid, G. F. (1995). Basal Ganglia. Dans G. Paxinos (dir.), *The rat nervous system* (p. 579–628). San Diego, CA: Academic Press.
- Helier, P. M. et Finley, F. N. (1992). Variable uses of alternative conceptions: A case study in current electricity. *Journal of Research in Science Teaching*, 29(3), 259-275.
- Heller, P. (1987). *Use of core propositions in solving current electricity problems*. Dans J. D. Novak (prés.), *Proceedings of the Second International Seminar and Mathematics* (Vol. III, p. 225-235). Ithaca, NY: Department of Education, Cornell University.
- Henson, R. (2005). What can functional neuroimaging tell the experimental psychologist? *The Quaterly Journal of Experimental Psychology: Section A*, 58(2), 193-233.
- Henson, R. (2006) Forward inference using functional neuroimaging: dissociations versus associations. *Trends Cogn. Sci.*, 10(2) 64-69. DOI: 10.1016/j.tics.2005.1 2.005
- Henson, R. N. A., Hornberger, M. et Rugg, M. D. (2005). Further Dissociating the Processes Involved in Recognition Memory: An fMRI Study. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 17(7), 1058–1073.
- Henson, R. N. A., Rugg, M. D., Shallice, T. et Dolan, R. J. (2000). Confidence in recognition memory for words: dissociating right prefrontal roles in episodic retrieval. *J. Cogn. Neurosci.*, 12(6), 913-23.
- Henson, R. N. A., Rugg, M. D., Shallice, T., Josephs, O. et Dolan, R. J. (1999b). Recollection and familiarity in recognition memory: An event-related functional magnetic resonance imaging study. *Journal of Neuroscience*, 19, 3962–3972.
- Henson, R. N. A., Shallice, T. et Dolan, R. J. (1999). Right prefrontal cortex and episodic memory retrieval: a functional fMRI test of the monitoring hypothesis. *Brain*, 122, 1367-1381.

- Henson, R. N. A., Shallice, T., Josephs, O. et Dolan, R. J. (2002). Functional Magnetic Resonance Imaging of Proactive Interference during Spoken Cued Recall. *NeuroImage*, 17, 543–558. DOI: 10.1006/nimg.2002.1229
- Hewson, P. W. (1981). A conceptual change approach to learning science. *European Journal of Science Education*, 3, 383–396.
- Hewson, P. W. (1985). Epistemological commitments in the learning of science: Examples from dynamics. *European Journal of Science Education*, 7, 163–172.
- Hewson, P. W. (1992). *Conceptual change in science teaching and teacher education*. Communication présentée à une rencontre sur le thème “Research and Curriculum Development in Science Teaching,” sous les auspices du National Center for Educational Research, Documentation, and Assessment. Ministère de l'Éducation et de la Science, Madrid, Espagne.
- Hewson, P. W. et Hewson, M. G. (1992). *The status of students' conceptions*. Dans R. Duit, F. Goldberg, et H. Niedderer (prés.), *Research in physics learning: theoretical issues and empirical studies* (p. 59–73). Kiel, Allemagne: Institute for Science Education.
- Hirshhorn, M., Grady, C. L., Rosenbaum, R. S., Winocur, G. et Moscovitch, M. (2012). Brain regions involved in the retrieval of spatial and episodic details associated with a familiar environment: An fMRI study. *Neuropsychologia*, 50, 3094–3106.
- Hizarcı, T., Atılboz, N. G. et Salman, S. (2005). A study on the attitudes of elementary school students from two different socio-economic regions towards living organisms. *Journal of Gazi Educational Faculty*, 25(2), 55–69.
- Holroyd, C. B., Nieuwenhuis, S., Yeung, N., Nystrom, L., Mars, R. B., Coles, M. G., & al. (2004). Dorsal anterior cingulate cortex shows fMRI response to internal and external error signals. *Nature Neuroscience*, 7, 497–498.
- Houdé, O. (2004). *La psychologie de l'enfant*. Paris: Presses universitaires de France.
- Houdé, O. (2006). Neuropédagogie? Entretien avec Olivier Houdé réalisé par Gilles Marchand. *Le Monde de l'intelligence*, 4, 18-19.
- Houdé, O. (2007). First insights on neuropedagogy of reasoning. *Thinking & Reasoning*, 13, 81–89. DOI: 10.1080/13546780500450599
- Houdé, O. (2014). *Apprendre à résister*. Paris: 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), 1-7. DOI: 10.3389/fpsyg.2014.00616
- Houdé, O. et Moutier, S. (1996). Deductive reasoning and experimental inhibition training: The case of the matching bias. *Curr. Psychol. Cognit.*, 15, 409–434.
- Houdé, O. et Moutier, S. (1999). Deductive reasoning and experimental inhibition training: The case of the matching bias. New data and reply to Girotto. *Curr. Psychol. Cognit.*, 18, 75–85.
- Houdé, O., Pineau, A., Leroux, G., Poirel, N., Perchey, G., Lanoë, C., . . . Mazoyer, B. (2011). Functional MRI study of Piaget's conservation-of-number task in preschool and school-age children: A neo-Piagetian approach. *Journal of Experimental Child Psychology*, 110, 332–346. DOI: 10.1016/j.jecp.2011.04.008
- Houdé, O., Zago, L., Crivello, F., Moutier, S., Pineau, A., Mazoyer, B. et Tzourio-Mazoyer, N. (2001). Access to deductive logic depends on a right ventromedial prefrontal area devoted to emotion and feeling: evidence from a training paradigm. *NeuroImage*, 14, 1486-1492. DOI: 10.1006/nimg.2001.0930
- 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.
- Howard-Jones, P. A. (2010). *Introducing Neuroeducational Research: Neuroscience, Education and the Brain from Contexts to Practice*. (Routledge, 2010).
- Howell, D. C. (2008). *Méthodes statistiques en sciences humaines*. Bruxelles, Bel.: de Boeck.
- Hubisz, J. (2001). Report on a study of middle school physical science texts. *The Physics Teacher*, 5(39), 304-309.
- Huettel, S. A., Song, A. W. et McCarthy, G. (2004). *Functional magnetic resonance imaging*. Sunderland, USA: Sinauer Associates Inc.
- Hume, D. *Enquête sur l'entendement humain*. Récupéré de http://classiques.uqac.ca/classiques/Hume_david/enquete_entendement_humain/Enquete_entende_humain.pdf

- Hunter, S. K., Kisley, M. A., McCarthy, L., Freedman, R. et Rossi, R. G. (2011). Diminished Cerebral Inhibition in Neonates Associated With Risk Factors for Schizophrenia: Parental Psychosis, Maternal Depression, and Nicotine Use. *Schizophrenia Bulletin*, 37(6), 1200–1208.
- Hynd, C., McWorther, Y., Phares, V. et William, S. (1994). The role of instructional variables in conceptual change in high school physics topics. *Journal of Research in Science Teaching*, 31(9), 933-946.
- Ikeda, Y., Okuzumi, H. et Kokubun, M. (2014). Stroop-Like Interference in the Real Animal Size Test and the Pictorial Animal Size Test in 5- to 12- Year-Old Children and Young Adults. *Applied Neuropsychology: Child*, 3(2), 115-125. DOI: 10.1080/21622965.2012.725185
- Iacoviello, D., Petracca, A., Spezialetti, M. et Placidi, G. (2015). A real-time classification algorithm for EEG-based BCI driven by self-induced emotions. *Computer methods and programs in biomedicine*, 122, 293–303. Récupéré à <https://doi.org/10.1016/j.cmpb.2015.08.011>
- International Council of Associations for Science Education (2001). *ICase Online Journal* [pdf]. Récupéré de: http://www.icasonline.net/sei/web/index.php?option=com_content&view=article&id=109&Itemid=63
- Jahromi, L. B. (2013). Recognition memory. Dans F.R. Volkmar (dir.), *Encyclopedia of Autism Spectrum Disorders* (p. 2531). New York, NY: Springer. DOI: 10.1007/978-1-4419-1698-3,
- Jensen, M. et Finley, F. (1995). Teaching evolution using historical arguments in a conceptual change strategy. *Science Education*, 79(2), 147-166.
- Johnson, M. K. (1992). Mem: mechanisms of recollection. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 4(3), 268-280.
- Johnstone, T., Ores Walsh, K. S., Greischar, L. L., Alexander, A. L., Fox, A. S., Davidson, R. J. et Oakes, T. R. (2006). Motion correction and the use of motion covariates in multiple-subject fMRI analysis. *Hum. Brain Mapp.*, 27, 779–788. DOI: 10.1002/hbm.20219
- Jugueta, E. A. D., Go, C. K. C. et Indias, J. M. M. (2012). Free fall misconceptions: A comparison between science and non-science university majors. *Lat. Am. J. Phys. Educ*, 6 (Suppl. I), 145-148.

- Kahn, I, Davachi, L. et Wagner, A. D. (2004) Functional-neuroanatomic correlates of recollection: Implications for models of recognition memory. *J. Neurosci.*, 24, 4172–4180.
- Kanim, S. (2001). *Research-based modification to instruction in physics courses for engineers*. Récupéré de <http://spacegrant.nmsu.edu/conference/2001/Papers/Skanim>. [PDF].
- Kao, M.-H., Temkit, M. et Wong, W. K.. (2014). Recent developments in optimal experimental designs for functional magnetic resonance imaging. *World J. Radiol.*, 6(7), 437-445. DOI: 10.4329/wjr.v6.i7.437
- Kapur, S., Craik, F. I. M., Jones, C. et Brown, G. M. *et al.* (1995). Functional role of the prefrontal cortex in retrieval of memories: A PET study. *NeuroReport*, 6(14), 1880-1884.
- Kelemen, D. (1999a). Beliefs about purpose: On the origins of teleological thought. Dans M. Corballis et S. Lea (dir.), *The descent of mind: Psychological perspectives on hominid evolution* (p. 278–294). Oxford, UK: Oxford University Press.
- Kelemen, D. (1999b). Function, goals, and intention: Children’s teleological reasoning about objects. *Trends in Cognitive Sciences*, 3, 461–468.
- Kelemen, D. (1999c). Why are rocks pointy? Children’s preference for teleological explanations of the natural world. *Developmental Psychology*, 35, 1440–1452.
- Kelemen, D. (2004). Are children “intuitive theists”? Reasoning about purpose and design in nature. *Psychological Science*, 15, 295–301.
- Kelemen, D., & DiYanni, C. (2005). Intuitions about origins: Purpose and intelligent design in children’s reasoning about nature. *Journal of Cognition and Development*, 6, 3–31.
- Kelemen, D. et Rosset, E. (2009). The human function compunction: teleological explanation in adults. *Cognition*, 111(1), 138-143.
- Kelemen, D., Rottman, J. et Seston, R. (2013). Professional physical scientists display tenacious teleological tendencies: Purpose-based reasoning as a cognitive default. *Journal of Experimental Psychology*, 142(4), 1074-1083. DOI: 10.1037/a0030399

- Khalid, T. (2001). Pre-service Teachers' Misconceptions Regarding Three Environmental Issues. *Canadian Journal of Environmental Education*, 6, 102-120.
- Kim, E. et Pak, S.-J. (2001). Students do not overcome conceptual difficulties after solving 1000 traditional problems. *Am. J. Phys.* 70(7), 759-765.
- Kim H. (2010). Dissociating the roles of the default-mode, dorsal, and ventral networks in episodic memory retrieval. *Neuroimage*, 50, 1648-57.
- King, C. (2012). Common Earth science misconceptions in science teaching. *School science review*, 347, 45-52.
- King, J. A., Hartley, T., Spiers, H. J., Maguire, E. A. et Burgess, N. (2005). Anterior prefrontal involvement in episodic retrieval reflects contextual interference. *NeuroImage*, 28, 256 – 267.
- Kintsch, W. (1968). Recognition and free recall of organized lists. *Journal of Experimental Psychology*, 78, 481-487.
- Kiray, S. A., Gok, B. et Bozkir, A. S. (2015). Identifying the factors affecting science and mathematics achievement using data mining methods. *Journal of Education in Science, Environment and Health (JESEH)*, 1(1), 28-48.
- Klein, A., Mensh, B., Ghosh, S., Tourville, J. et Hirsch, J. (2005). Mindboggle: automated brain labeling with multiple atlases. *BMC Med. Imaging* 5(7). DOI : 10.1186/1471-2342-5-7
- Klopfer, L. E., Champagne, A. B. et Gunstone, R. F. (1983). Naive Knowledge and Science Learning. *Research in Science & Technological Education*, 1(2), 173-183. Récupéré de <http://dx.doi.org/10.1080/0263514830010205>
- Kocyigit, S. (2003). *The relation among students' gender, socio-economic status, interest, experience and misconceptions about static electricity at ninth grade level* (Thèse de doctorat, Middle East Technical University, Turquie). Récupéré de <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download;jsessionid=C09F42C62B187509FE3C24236DF250A7?doi=10.1.1.632.4431&rep=rep1&type=pdf>
- Kolar, C. et Ho-Wisniewski, E. (2009). Assessing High School Gifted Student Progress in Science Through Misconceptions and MOSART. Communication présentée à l'American Educational Research Association Annual Meeting, San Diego, CA. Récupéré de http://digitalcommons.imsa.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1003&context=oir_pr

- Konishi, S., Kawazu, M., Uchida, I., Kikyo, H., Asakura, I. et Miyashita, Y. (1999). Contribution of working memory to transient activation in human inferior prefrontal cortex during performance of the Wisconsin Card Sorting Test. *Cerebral Cortex*, 9, 745-753.
- Konishi, S., Nakajima, K., Uchida, I., Kikyo, H., Kameyama, M. et Miyashita, Y. (1999). Common inhibitory mechanism in human inferior prefrontal cortex revealed by event-related functional MRI. *Brain*, 122, 981-991.
- Koriat, A. et Goldsmith, M. (1996). Monitoring and Control Processes in the Strategic Regulation of Memory Accuracy. *Psychological Review*, 103(3), 490-517.
- Korur, F. (2015). Exploring Seventh-Grade Students' and Pre-Service Science Teachers' Misconceptions in Astronomical Concepts. *Eurasia Journal of Mathematics, Science & Technology Education*, 11(5), 1041-1060.
- Koszalka, T. A. (2002). Technology Resources as a Mediating Factor in Career Interest Development. *Educational Technology & Society*, 5(2), 29-38.
- Krause, B. J., Schmidt, D., Mottaghy, F. M., Taylor, J., Halsband, U., Herzog, H., Tellmann, L. et Muller-Gartner, H.-W. (1999). Episodic retrieval activates the precuneus irrespective of the imagery content of word pair associates A PET study. *Brain*, 122, 255-263.
- Ku, S.-P., Gretton, A., Macke, J. et Logothetis, N. K. (2008). Comparison of pattern recognition methods in classifying high-resolution BOLD signals obtained at high magnetic field in monkeys. *Magn. Reson. Imaging*, 26, 1007-1014.
- Kucukozer, H. et Kocakulah, S. (2007). Secondary School Students' Misconceptions about Simple Electric Circuits. *Journal of Turkish Science Education*, 4(1), 101-115.
- Kucukozer, H. et Kocakulah, S. (2008). Effect of Simple Electric Circuits Teaching on Conceptual Change in Grade 9 Physics Course. *Journal of Turkish Science Education*, 1(5), 2008.
- Kuhl, B. A., Dudukovic, N. M., Kahn, I. et Wagner, A. D. (2007). Decreased demands on cognitive control reveal the neural processing benefits of forgetting. *Nature Neuroscience*, 10(7), 908-914. DOI: 10.1038/nn1918
- Kwon, Y.-J. et Lawson, A. E. (2000). Linking brain growth with the development of scientific reasoning ability and conceptual change during adolescence. *Journal of Research in Science Teaching*, 37, 44-62.

- Kwong, K. K., Belliveau, J. W., Chesler, D. A., Goldberg, I. E., Weisskoff, R. M., Poncelet, B. P., ... Rosen, B. R. (1992). Dynamic magnetic resonance imaging of human brain activity during primary sensory stimulation. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 89, 5675-5679.
- Kuhn, T. S. (1962). *La structure des révolutions scientifiques*. Paris: Champs-Flammarion.
- Kuhn, T. S. (1970/1996). *The Structure of Scientific Revolutions*. Chicago, Ill.: University Of Chicago Press.
- Kukull, W. A. et Ganguli, M. (2014). Generalizability: The trees, the forest, and the low-hanging fruit. *Neurology*, 78, 1886-1891.
- Kwong, K. K., Belliveau, J. W., Chesler, D. A., Goldberg, I. E., Weisskoff, R. M., Poncelet, B. P., ... Rosen, B. R. (1992). Dynamic magnetic resonance imaging of human brain activity during primary sensory stimulation. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 89, 5675-5679.
- Lafortune, S. (2012). *Le rôle de l'inhibition dans la capacité à surmonter des interférences intuitives en sciences*. (Thèse de doctorat, Université du Québec à Montréal). Récupéré de <http://www.archipel.uqam.ca/5685/>
- Lafortune, S., Masson, S. et Potvin, P. (2012). *Does inhibition have a key role to play in overcoming intuitive interferences in science?* Affiche présentée au Neuroscience and education 2012 meeting of the EARLI SIG 22, Londres, UK.
- Laird, A. R., McMillan, K. M., Lancaster, J. L., Kochunov, P., Turkeltaub, P. E., Pardo, J. V. et Fox, P. T. (2005). A comparison of label-based meta-analysis and activation likelihood estimation in the Stroop task. *Hum Brain Mapp.*, 25(1), 6-21.
- Le Bihan, D. et Lehericy, S. (1999). Aspects pratiques de la réalisation d'une IRM fonctionnelle. *Journal of Neuroradiology*, 26(1), 54.
- Lee, G. et Byun, T. (2012). An Explanation for the Difficulty of Leading Conceptual Change Using a Counterintuitive Demonstration: The Relationship Between Cognitive Conflict and Responses. *Res Sci Educ*, 42, 943-965. DOI : 10.1007/s11165-011-9234-5
- Leech, R., Braga, R. et Sharp, D. J. (2012). Echoes of the brain within the posterior cingulate cortex. *J. Neurosci.*, 32, 215-22.

- Leech, R. et Sharp, D. J. (2014). The role of the posterior cingulate cortex in cognition and disease. *Brain*, 137, 12–32. DOI: 10.1093/brain/awt162
- Legendre, M.-F. (2002). Le rôle du raisonnement qualitatif dans les processus de changement conceptuel et ses implications pour l'enseignement. Dans Rodolphe T. (dir.), *Changement conceptuel et apprentissage des sciences : recherche et pratiques* (p. 177-203). Montréal: Éditions Logiques.
- Legendre, R. (2005). *Dictionnaire actuel de l'éducation* (3e éd.). Montréal, Québec: Guérin.
- Le Lan, J. (2013). *Prototype d'imagerie cérébrale multicanal portable par spectroscopie proche-infrarouge et électroencéphalographie* (Mémoire de maîtrise, Université de Montréal, Montréal, Québec). Récupéré de <https://publications.polymtl.ca/1088/>
- Lepage, M., Ghaffar, O., Nyberg, L. et Tulving, E. (1999). Prefrontal cortex and episodic memory retrieval mode. *Proceedings of the National Academy of Science of the United States of America (PNAS)*, 97(1), 506-511. DOI: 10.1073/pnas.97.1.506
- Leube, D. T., Rapp, A., Buchkremer, G., Bartels, M., Kircher, T. T., Erb, M. et Grodd, W. (2003). Hippocampal dysfunction during episodic memory encoding in patients with schizophrenia-an fMRI study. *Schizophr Res.*, 64(1), 83-5.
- Leung, H.-C., Skudlarski, P., Gatenby, J. C., Peterson, B. S. et Gore, J. C. (2000). An event-related functional fMRI study of the Stroop color word interference task. *Cerebral Cortex*, 10, 552-560.
- Levy, B. L. et Wagner, A. D. (2011). Cognitive control and right ventrolateral prefrontal cortex: reflexive reorienting, motor inhibition, and action updating. *Ann N Y Acad Sci.*, 1224(1), 40–62. DOI: 10.1111/j.1749-6632.2011.05958.x.
- Li, S. C., Law, N. et Lui, K. F. A. (2006). Cognitive perturbation through dynamic modeling: A pedagogical approach to conceptual change in science. *Journal of Computer Assisted Learning*, 22(6), 405–422.
- Liben, L. (1983). *Piaget and the foundations of knowledge*. New Jersey: Lawrence Erlbaum Associates.
- Liddle, P. F., Kiehl, K. A. et Smith, A. M. (2001). Event-related fMRI study of response inhibition. *Human Brain Mapping*, 12(2), 100–109.

- Lie, C. H., Specht, K., Marshall, J. C. et Fink, G. R. (2006). Using fMRI to decompose the neural processes underlying the Wisconsin Card Sorting Test. *NeuroImage*, 30(3), 1038-49.
- Lieberman, M. D., Cunningham, W. A. (2009). Type I and type II error concerns in fMRI research: re-balancing the scale. *Soc. Cogn. Affect. Neurosci.*, 4, 423-428.
- Liegeois, L. et Mullet, E. (2002). High school students' understanding of resistance in simple series electric circuits. *International Journal of Science Education*, 24(6), 551-564.
- Liegeois, L., Chasseigne, G. et Papin, S. (2003). Improving high school students' understanding of potential difference in simple electric circuits. *International Journal of Science Education*, 25(9), 1129-1145.
- Limon, M. (2001). On the cognitive conflict as an instructional strategy for conceptual change: a critical appraisal. *Learning and Instruction*, 11, 357-380.
- Linder, C. J. (1993). A challenge to conceptual change. *Science Education*, 77(3), 293-300.
- Lindquist, M. A. (2008). The Statistical Analysis of fMRI Data. *Statistical Science*, 23(4), 439-464. DOI: 10.1214/09-STS282
- Liu, X. (2001). Synthesizing research on student conceptions in science. *International Journal of Science Education*, 23(1), 55-81. DOI: 10.1080/09500690119778
- Liu, X. (2010). *Using and Developing Measurement Instruments in Science Education: A Rasch Modeling Approach*. Charlotte, NC: Information Age Publishing.
- Locke, J. (1690/2015). *An Essay Concerning Human Understanding*. Récupéré de <https://ebooks.adelaide.edu.au/l/locke/john/l81u/>
- Lombrozo, T., Kelemen, D. et Zaitchik, D. (2007). Inferring design: Evidence of a preference for teleological explanations in patients with Alzheimer's disease. *Psychological Science*, 18, 999-1006. DOI: 10.1111/j.1467-9280.2007.02015.x
- Lu, Z.-L. et Doshier, B. A. (2007). Cognitive Psychology. *Scholarpedia*, 2(8), 2769.

- Lum, J. A. G. et Conti-Ramsden, G. (2014). Long-Term Memory A Review and Meta-Analysis of Studies of Declarative and Procedural Memory in Specific Language Impairment. *Top Lang Disorders*, 33(4), 282–297.
- Lum, J. A. G., Ullman, M. T. et Conti-Ramsden, G. (2013). Procedural learning is impaired in dyslexia: Evidence from a meta-analysis of serial reaction time studies. *Research in Developmental Disabilities*, 34, 3460–3476.
- Lynn, R. (2010). High IQ is sufficient to explain the high achievements in math and science of the East Asian peoples. *Learning and Individual Differences*, 20, 567–568.
- MacDonald, A. W., Cohen, J. D., Stenger, V. A. et Carter, C. S. (2000). Dissociating the role of dorsolateral prefrontal and anterior cingulate cortex in cognitive control. *Science*, 288, 1835-1838.
- Maki, A., Yamashita, Y., Ito, Y., Watanabe, E., Mayanagi, Y. et Koizumi, H. (1995). Spatial and temporal analysis of human motor activity using noninvasive NIR topography. *Medical Physics*, 22(12), 1997-2005.
- Marsman, J. B. C., Renken, R., Haak, K. V. et Cornelissen, F. W. (2013). Linking cortical visual processing to viewing behavior using fMRI. *Frontiers in Systems Neuroscience*, 7(109), 1-9. DOI: 10.3389/fnsys.2013.00109
- Marsman, J. B. C., Renken, R., Velichkovsky, B. M., Hooymans, J. M. M. et Cornelissen, F. W. (2012). Fixation Based Event-Related fMRI Analysis: Using Eye Fixations as Events in Functional Magnetic Resonance Imaging to Reveal Cortical Processing During the Free Exploration of Visual Images. *Human Brain Mapping*, 33, 307–318.
- Martin, M. O., Mullis, I. V. S., Foy, P. et Stanco, G. M. (2012). *TIMSS 2011: International results in science*. Chestnut Hill, MA: TIMSS & PIRLS International Study Center, Boston College.
- Masnick, A. M., Valenti, S. S., Cox, B. D. et Osman, C. J. (2010). A Multidimensional Scaling Analysis of Students' Attitudes about Science Careers. *International Journal of Science Education*, 32(5), 653-667. DOI: 10.1080/09500690902759053
- Masson, S. (2007). Enseigner les sciences en s'appuyant sur la neurodidactique des sciences. Dans P. Potvin, M. Riopel et S. Masson (dir.), *Enseigner les sciences : regards multiples* (p. 308-321). Québec : Éditions MultiMondes.

- Masson, S. (2012). *Étude des mécanismes cérébraux liés à l'expertise scientifique en électricité à l'aide de l'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle* (Thèse de doctorat, Université du Québec à Montréal). Récupéré de <http://www.archipel.uqam.ca/4876/1/D2287.pdf> (4876)
- Masson, S., Potvin, P. et Riopel, M. (2010). *Étude des mécanismes cérébraux liés à l'apprentissage de l'électricité*. Communication présentée au 78e Congrès de l'Association Francophone pour le Savoir (ACFAS), École Polytechnique, Montréal, Québec.
- Masson, S., Potvin, P., Riopel, M. et Brault Foisy, L.-M. (2014). Differences in brain activation between novices and experts in science during a task involving a common misconception in electricity. *Mind, Brain, and Education*, 8(1), 37-48.
- Matteson, H. D. et Kambly, P. E. (1940). Knowledge of science possessed by pupils entering seventh grade. *School Science and Mathematics*, 40, 244-247.
- Mayer, M. (1987). Common sense knowledge vs. scientific knowledge: The case of pressure, weight and gravity. Dans J. D. Novak (prés.), *Proceeding of the Second International Seminar on Misconceptions and Educational Strategies in Science and Mathematics* (Vol. I, pp. 289-298). Ihtaca, NY: Department of Education, Cornell University.
- McDermott, L. (1984). Research on conceptual understanding in mechanics. *Physics today*, 37, 24-32.
- McIldowie, E. (1998). Teaching voltage-current relationships without Ohm's law. *Physics Education*, 33(5), 292-295.
- Mega, M. S., Dinov, I. D., Mazziotta, J. C., Manese, M., Thompson, P.M., Lindshield, ... Toga, A. W. (2005). Automated brain tissue assessment in the elderly and demented population: construction and validation of a sub-volume probabilistic brain atlas. *NeuroImage*, 26(4), 1009-1018.
- MELS. (2001). Programme de formation de l'école québécoise, enseignement primaire : domaine de la mathématique, de la science et de la technologie. Récupéré de http://www.education.gouv.qc.ca/fileadmin/site_web/documents/PFEQ/prform2001-062.pdf
- MELS. (2006). Programme de formation de l'école québécoise, enseignement secondaire : domaine de la mathématique, de la science et de la technologie. Récupéré de: http://www.education.gouv.qc.ca/fileadmin/site_web/documents/PFEQ/6c-sciencetechno.pdf

- MELS. (2012). *Examens et épreuves : Taux de réussite pour chaque épreuve unique de juin 2012, par organisme scolaire*. Récupéré de <http://www.education.gouv.qc.ca/eleves/examens-et-epreuves/resultats-aux-epreuves-unique-de-juin-2012/>
- MELS. (2013). *Examens et épreuves : Taux de réussite pour chaque épreuve unique de juin 2013, par organisme scolaire*. Récupéré de <http://www.education.gouv.qc.ca/eleves/examens-et-epreuves/resultats-aux-epreuves-unique-de-juin-2013/tableau-9/>
- MELS. (2015). *Examens et épreuves : Taux de réussite pour chaque épreuve unique de juin 2015, par organisme scolaire*. Récupéré de <http://www.education.gouv.qc.ca/references/publications/resultats-de-la-recherche/detail/article/resultats-aux-epreuves-unique-de-juin/>
- Menon, V., Adleman, 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*, 131–143.
- Meurant, G. (2012). *Learning and memory: a biological view*. Academic Press.
- Mikl, M., Mareček, R., Hlušík, P., Pavlicová, M., Drasticha, A., Chlebus, P., Brázdil, M. et Krupaf, P. (2008). Effects of spatial smoothing on fMRI group inferences. *Magnetic Resonance Imaging, 26*, 490–503.
- Mikropoulos, T. A. et Natsis, A. (2011). Educational virtual environments: A ten-year review of empirical research (1999–2009). *Computers & Education, 56*, 769–780.
- Milham, M. P., Banich, M. T. et Barad, V. (2003). Competition for priority in processing increases prefrontal cortex's involvement in top-down control: an event-related fMRI study of the stroop task. *Cognitive Brain Research, 17*, 212–222.
- Milham, M. P., Erickson, K. I., Banich, M. T., Kramer, A. F., Webb, A., Wszalek, T. et Cohen, N. J. (2002). Attentional Control in the Aging Brain: Insights from an fMRI Study of the Stroop Task. *Brain and Cognition, 49*, 277–296. DOI: 10.1006/brcg.2001.1501
- Millar, R. (1989). Constructive criticisms. *International Journal of Science Education, 1*, 587-596.
- Mintzes, J. J., Trowbridge, J. E., Arnaudin, M. et Wandersee, J. H. (1991). Children's biology: Studies on conceptual development in the life sciences. Dans S.

- Glynn et B. Britton (dir.), *The psychology of learning science* (p. 179-202). Hillsdale, N. J.: Lawrence Erlbaum.
- Mitchell, J. P. (2007). Activity in right temporo-parietal junction is not selective for theory-of-mind. *Cerebral cortex*, *18*, 262–271. DOI: 10.1093/cercor/bhm051
- Miyake, A. et Friedman, N. P. (2012). The Nature and Organization of Individual Differences in Executive Functions: Four General Conclusions. *Curr Dir Psychol Sci.*, *21*(1), 8–14. DOI: 10.1177/0963721411429458
- Miyake, A., Friedman, N. P., Emerson, M. J., Witzki, A. H., Howerter, A. et Wager, T. D. (2000). The unity and diversity of executive functions and their contributions to complex “frontal lobe” tasks: A latent variable analysis. *Cognitive Psychology*, *41*, 49–100.
- Monchi, O., Petrides, M., Petre, V., Worsley, K. et Dagher, A. (2001). Wisconsin card sorting revisited: distinct neural circuits participating in different stages of the task identified by event-related functional magnetic resonance imaging. *J Neurosci*, *21*(19), 7733–41.
- Morcom, A. M., Li, J. et Rugg, M. D. (2007). Age effects on the neural correlates of episodic retrieval: Increased cortical recruitment with matched performance. *Cerebral Cortex*, *17*, 2491–2506.
- Mortimer, E. F. (1995). Conceptual change or conceptual profile change? *Science & Education*, *3*, 267-285.
- Moscovitch, C., Kapur, S., Köhler, S. et Houle, S. (1995). Distinct neural correlates of visual long-term memory for spatial location and object identity: a positron emission tomography study in humans. *Proc. Natl Acad. Sci. U. S. A.*, *92*(9), 3721–3725.
- Moscovitch, M. et McAndrews, M. P. (2002). Material-specific deficits in “remembering” in patients with unilateral temporal lobe epilepsy and excisions. *Neuropsychologia*, *40*, 1335–1342.
- Moscovitch, M., Rosenbaum, R. S., Gilboa, A., Addis, D. R., Westmacott, R., Grady, C., ... Nadel, L. (2005). Functional neuroanatomy of remote episodic, semantic and spatial memory: A unified account based on multiple trace theory. *Journal of Anatomy*, *207*, 35–66.
- Moscovitch, M. et Winocur, G. (2002). The frontal cortex and working with memory. Dans D. T. Stuss et R. T. Knight (dir.), *The Frontal Lobes* (p. 188–209). Oxford, UK: Oxford University Press.

- Mostofsky, S. H., Schafer, J. G., Abrams, M. T., Goldberg, M. C., Flower, A. A., Boyce, A., ... Pekar, J. J. (2003). fMRI evidence that the neural basis of response inhibition is task-dependent. *Brain Research. Cognitive Brain Research*, 17(2), 419–430.
- Moutier, S., Angeard, N. et Houdé, O. (2002). Deductive reasoning and matching-bias inhibition training: evidence from a debiasing paradigm. *Thinking & Reasoning*, 8, 205–224.
- Mullis, I. V., Martin, M. O., Foy, P. et Arora, A. (2012). *TIMSS 2011 International Results in Mathematics*. Amsterdam, Pays-Bas: International Association for the Evaluation of Educational Achievement.
- Munz, M., Gobert, D., Schohl, A., Poquérusse, J., Podgorski, K., Spratt, P. et Ruthazer, E. (2014). Rapid Hebbian axonal remodeling mediated by visual stimulation. *Neuroscience*, 344(6186), 904-909. DOI: 10.1126/science.1251593
- 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.
- Nagahama, Y., Fukuyama, H., Yamauchi, H., Matsuzaki, S., Konishi, J., Shibasaki, H. et Kimura, J. (1996). Cerebral activation during performance of a card sorting test. *Brain*, 119, 1667–1675.
- Naghavi, H. R. et Nyberg L. (2005). Common fronto-parietal activity in attention, memory, and consciousness: shared demands on integration? *Conscious Cogn.*, 14, 390–425.
- National Science Foundation. (2014). *Science and engineering indicators 2014: Chapter 7. Science and Technology: Public Attitudes and Understanding*. Récupéré de <https://www.nsf.gov/statistics/seind14/index.cfm/chapter7/c7h.htm#page=23>
- Nee, D. E., Wager, T. D. et Jonides, J. (2007). Interference resolution: Insights from a meta-analysis of neuroimaging tasks. *Cognitive, Affective, & Behavioral Neuroscience*, 7(1), 1-17.
- Nelson, J. K., Lizcano, R. A., Atkins, L. et Dunbar, K. (2007). *Conceptual judgments of expert vs. novice chemistry students: an fMRI study*. Affiche présentée au 48th Annual meeting of the Psychonomic Society, Hyatt Regency Hotel, Long Beach, California, USA.

- Nelson, S. M., Cohen, A. L., Power, J. D., Wig, G. S., Miezin, F. M., Wheeler, M. E., ... Petersen, S. E. (2010). A Parcellation Scheme for Human Left Lateral Parietal Cortex. *Neuron*, 67(1), 156–170. DOI: 10.1016/j.neuron.2010.05.025
- Nersessian, N. J. (1999). Model-based reasoning in conceptual change. Dans L. Magnini, N. J. Nersessian et P. Thagard (dir.), *Model-based reasoning in scientific discovery* (p. 5-22). New York, NY: Kluwer Academic.
- Neubauer, A. C., Fink, A. et Schrausser, D. G. (2002). Intelligence and neural efficiency: the influence of task content and sex on the brain–IQ relationship. *Intelligence*, 30(6), 515–536.
- Nichols, T. et Hayasaka, S. (2003). Controlling the familywise error rate in functional neuroimaging: a comparative review. *Statistical Methods in Medical Research*, 12, 419-446.
- Nichols, E. A., Kao, Y. C., Verfaellie, M. et Gabrieli, J. D. E. (2006). Working memory and long-term memory for faces: Evidence from fMRI and global amnesia for involvement of the medial temporal lobes. *Hippocampus*, 16, 604–616.
- Nieto-Castanon, A., Ghosh, S. S., Tourville, J. A. et Guenther, F. H. (2003). Region of interest based analysis of functional imaging data. *Neuroimage*, 19, 1303–16.
- Nigg, J. T. (2000). On Inhibition/Disinhibition in Developmental Psychopathology: Views from Cognitive and Personality Psychology and a Working Inhibition Taxonomy. *Psychological Bulletin*, 126, 220-246. Récupéré de <http://dx.doi.org/10.1037/0033-2909.126.2.220>
- Nolde, S. F., Johnson, M. K. et D'Esposito, M. (1998). Left prefrontal activation during episodic remembering: an event-related fMRI study. *Neuroreport*, 9(15), 3509-3514.
- Nussbaum, J. et Novick, S. (1982). Alternative frameworks, conceptual conflict and accommodation: Toward a principled teaching strategy. *Instructional Science*, 11(3), 183-200.
- Nyberg, L. (1999). Imaging Episodic Memory: Implications for Cognitive Theories and Phenomena. *Memory*, 7, 5-6, 585-597. DOI: 10.1080/096582199387760
- Nyberg, L., McIntosh, A. R., Cabeza, R., Habib, R., Houle, S. et Tulving, E. (1996). General and specific brain regions involved in encoding and retrieval of events: What, where, and when. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 93, 11280-11285.

- Nyberg, L., Tulving, E., Habib, R., Nilsson, L.-G., Kapur, S., Houle, S., Cabeza, R. et McIntosh, A. R. (1995). Functional brain maps of retrieval mode and recovery of episodic information. *NeuroReport*, 7, 249-252.
- OCDE (2002), Comprendre le cerveau : vers une nouvelle science de l'apprentissage. Paris : Les Éditions de l'OCDE.
- OCDE (2006). *Évolution de l'intérêt des jeunes pour les études scientifiques et technologiques: Rapport d'orientation*. Paris : Éditions de l'OCDE.
- OCDE (2007a), Comprendre le cerveau : naissance d'une science de l'apprentissage. Paris : Les Éditions de l'OCDE.
- OCDE (2007b). *PISA 2006: Les compétences en sciences, un atout pour réussir*. Paris : Éditions de l'OCDE.
- OCDE. (2008). *Encouraging student interest in science and technology studies*. Paris: OECD Publishing.
- OCDE. (2014). *PISA 2012 Results: What Students Know and Can Do – Student Performance in Mathematics, Reading and Science (Volume I, Revised edition, February 2014)*. PISA, OECD Publishing. Récupéré de <http://dx.doi.org/10.1787/9789264201118-en>
- OCDE. (2015). *À la hauteur : Résultats canadiens de l'étude PISA de l'OCDE: Le rendement des jeunes du Canada en sciences, en lecture et en mathématiques*. PISA, OECD Publishing. Récupéré de http://cmec.ca/Publications/Lists/Publications/Attachments/318/PISA2012_CanadianReport_FR_Web.pdf
- O'Conaill, C. R., Malisza, K. L., Buss, J. L., Bolster, R. B., Clancy, C., de Gervai, P. D., Chudley, A. E. et Longstaffe, S. (2015). Visual search for feature conjunctions: an fMRI study comparing alcohol-related neurodevelopmental disorder (ARND) to ADHD. *J. Neurodev. Disord.*, 7(1), 10. DOI: 10.1186/s11689-015-9106-9
- O'Connor, A. R., Han, S. et Dobbins, I. G. (2010). The inferior parietal lobule and recognition memory: Expectancy violation or successful retrieval? *The Journal of Neuroscience*, 30(8), 2924-2934. DOI: 10.1523/JNEUROSCI.4225-09.2010
- Ogawa, S., Lee, T. M., Kay, A. R. et Tank, D. W. (1990). Brain magnetic resonance imaging with contrast dependent on blood oxygenation. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 87(24), 9868-9872.

- Ogawa, S., Tank, D. W., Menon, R. S., Ellermann, J. M., Kim, S.-G., Merkle, H. et Ugurbil, K. (1992). Intrinsic signal changes accompanying sensory stimulation: Functional brain mapping using MRI. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 89, 5951-5955.
- Ohlsson, S. (2009). Resubsumption: A possible mechanism for conceptual change and belief revision. *Educational Psychologist*, 44(1), 20-40. DOI: 10.1080/00461520802616267
- Ohlsson, S. (2013). Beyond Evidence-Based Belief Formation: How Normative Ideas Have Constrained Conceptual Change Research. *Frontline Learning Research*, 2, 70-85.
- Olds, S. W. et Papalia, D. E. (2005). *Psychologie du développement humain* (6e éd.). Laval, Québec: Éditions Beauchemin.
- Oliver, J. S., Simpson, R. D. (1988). Influences of Attitude Toward Science, Achievement Motivation, and Science Self Concept on Achievement in Science: A Longitudinal Study. *Science Education*, 72(2), 143-155.
- Orringer, D., Vago, D. R. et Golby, A. J. (2012). Clinical Applications and Future Directions of Functional MRI. *Semin Neurol.*, 32(4), 466-475. DOI: 10.1055/s-0032-1331816.
- Osborne, R. (1981). Children's ideas about electric current. *New Zealand science teacher*, 29, 12-19.
- Osborne, R. (1983). Towards modifying childrens' ideas about electric current. *Research in Teaching and Technological Education*, 1, 73-82.
- Osborne, R. J., Bell, B. et Gilbert, J. K. (1983). Science teaching and children's views of the world. *European Journal of Science Education*, 5, 1-14.
- Osborne, R. et Freyberg, P. (1985). *Learning in science*. Hong Kong: Heinemann Education.
- Osborne, J., Simon, S. et Collins, S. (2003). Attitudes towards science: A review of the literature and its implications. *International Journal of Science Education*, 25(9), 1049-1079. DOI: 10.1080/0950069032000032199
- Osborne, R. J. et Wittrock, M. C. (1983). Learning science: a generative process. *Science Education*, 67(4), 489-508.

- Owen, A. M., Milner, B., Petrides, M. ET Evans, A. C. (1996). Memory for object features versus memory for object location: A positron-emission tomography study of encoding and retrieval processes. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 93, 9212-9217.
- Ozdemir, G., et Clark, D. B. (2007). An overview of conceptual change theories. *Eurasia Journal of Mathematics, Science & Technology Education*, 3(4), 351-361.
- Packard, M. G., & Knowlton, B. J. (2002). Learning and memory functions of the basal ganglia. *Annual Review of Neuroscience*, 25, 563-593.
- Papanastasiou, E. C., & Zemblyas, M. (2002). Effect of attitudes on science achievement: a study conducted among high school pupils in Cyprus. *Revue internationale de l'éducation*, 48(6), 469-484.
- Pardo, J. V., Pardo, P. J., Janer, K. W. et Raichle, M. E. (1990). The anterior cingulate cortex mediates processing selection in the Stroop attentional conflict paradigm. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 87(1), 256-259.
- Park, J., Kim, I., Kim, M. et Lee, M. (2001). Analysis of students' processes of confirmation and falsification of their prior ideas about electrostatics. *International Journal of Science Education*, 23(12), 1219-1236.
- Periago, M. C. et Bohigas, X. (2005). The persistence of prior concepts about electric potential, current intensity and Ohm's Law in students of engineering. *Revista Electrónica de Investigación Educativa*, 7(2). Récupéré de <http://redie.ens.uabc.mx/vol7no2/contents-periago.html>
- Peters, P. (1982). Even honors students have conceptual difficulties with physics. *Am J Physics*, 50, 501-508.
- Pettersson, K. M., Elfgren, C. et Ingvar, M. (1997). A Dynamic Role of the Medial Temporal Lobe during Retrieval of Declarative Memory in Man. *Neuroimage*, 6, 1-11.
- Petrides, M. (2005). Lateral prefrontal cortex: architectonic and functional organization. *Philosophical transactions of the Royal Society of London, Series B, Biological sciences*, 360(1456), 781-795. DOI: 10.1098/rstb.2005.1631
- Petitto, L.-A. et Dunbar, K. (2004). New findings from educational neuroscience on bilingual brains, scientific brains, and the educated mind. Dans K. Fisher et T.

- Katzir (dir.), *Building usable knowledge in mind, brain, & education*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Petrides, M. (2005). Lateral prefrontal cortex: architectonic and functional organization. *Philosophical transactions of the Royal Society of London, Series B, Biological sciences*, 360(1456), 781-795. DOI: 10.1098/rstb.2005.1631
- Pfundt, H. et Duit, R. (1985). *Bibliography: Student alternative frameworks and science education*. Kiel, Allemagne: University of Kiel Institute for Science Education.
- Piaget, J. (1970). *Science of education and the psychology of the child* (Traduction du français par Derek Coltman). New York : Orion Press.
- Pines, A. L. et West, L. H. T. (1986). Conceptual understanding and science learning: an interpretation of research within a sources-of-knowledge framework. *Science Education*, 70(5), 583-604.
- Pintrich, P. R., Marx, R. W. et Boyle, R. A. (1993). Beyond cold conceptual change: the role of motivational beliefs and classroom contextual factors in the process of conceptual change. *Review of Educational Research*, 63(2), 167-199.
- Placek, W. A. (1985). *A study of preconceived knowledge of mechanical concepts among elementary and secondary gifted learners* (Thèse de doctorat). University of Pennsylvania, PA.
- Platel, H., Baron, J.-C., Desgranges, B., Bernard, F. et Eustache, F. (2003). Semantic and episodic memory of music are subserved by distinct neural networks. *Neuroimage*, 20, 2444-56.
- Pizzella, V., Marzetti, L., Della Penna, S., de Pasquale, F., Zappasodi, F. et Romani, G. L. (2014). Magnetoencephalography in the study of brain dynamics. *Functional Neurology*, 29(4), 241-253.
- Poldrack, R. A. (2006). Can cognitive processes be inferred from neuroimaging data? *Trends in Cognitive Sciences*, 20(20), 1-5.
- Poldrack, R. A. (2007). Region of interest analysis for fMRI. *Soc. Cogn. Affect. Neurosci.* 2, 67-70.
- Poldrack, R. A., Fletcher, P. C., Henson, R. N., Worsley, K. J., Brett, M. et Nichols, T. E. (2008). Guidelines for reporting an fMRI study. *NeuroImage*, 40, 409-414.

- Poldrack, R. A., Mumford, J. A. et Nichols, T. E. (2011). *Handbook of functional MRI data analysis*. New York, NY: Cambridge University Press.
- Poldrack, R. A. et Wagner, A. D. (2004). What can neuroimaging tell us about the mind? Insights from prefrontal cortex. *Curr. Dir. Psychol. Sci.*, 13(5), 177–181.
- Posner, G. J. et Gertzog, W. A. (1982). The clinical interview and the measurement of conceptual change. *Science Education*, 66(2), 195-209.
- Posner, G. J., Strike, K. A., Hewson, P. W. et Gertzog, W. A. (1982). Accommodation of a scientific conception: Toward a theory of conceptual change. *Science Education*, 66(2), 211-227.
- Posner, J., Maia, T. V., Fair, D., Peterson, B. S., Sonuga-Barke, E. J. et Nagel, B. J. (2011). The attenuation of dysfunctional emotional processing with stimulant medication: an fMRI study of adolescents with ADHD. *Psychiatry Res.*, 193, 151–160. DOI: 10.1016/j.psychres.2011.02.005
- Potvin, P. (2011). Manuel d'enseignement des sciences et de la technologie : Pour intéresser les élèves du secondaire. Québec (Québec): Éditions Multimondes.
- Potvin, P. (2013). Proposition for improving the classical models of conceptual change based on neuroeducational evidence: conceptual prevalence. *Neuroeducation*, 2(1), 16-43.
- Potvin, P. et Cyr, G. (2017a). The coexistence claim and its possible implications for success in teaching for conceptual “change”. *European Journal of Science and Mathematics Education*, 5(1), 55–66.
- Potvin, P. et Cyr, G. (2017b). Toward a Durable Prevalence of Scientific Conceptions: Tracking the Effects of Two Interfering Misconceptions About Buoyancy From Preschoolers to Science Teachers. *Journal of Research in Science Teaching*. DOI : 10.1002/tea.21396
- 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, 21-43.
- Potvin, P., Riopel, M., Charland, P., Masson, S., Durocher, É. et Bêty, M.-N. (2009). *Classroom explicitation of unexpected conceptions: enhanced cognitive conflict of harmful contamination?* Communication présentée à l'European Science Education Research Association (ESERA) conference, Istanbul,

Turquie.

- Potvin, P., Sauriol, E. et Riopel, M. (2015). Experimental evidence of the superiority of the prevalence model of conceptual change over the classical models and traditional teaching. *Journal of Research in Science Teaching*, 52(8), 1082–1108. Récupéré de <https://doi.org/10.1002/tea.21235>
- Rajah, M. N., Maillet, D. et Grady, C. L. (2015). Episodic Memory in Healthy Older Adults. Dans D. R. Addis, M. Barense et A. Duarte (dir.), *The Wiley Handbook on the Cognitive Neuroscience of Memory* (p. 347-370). Hoboken, New Jersey, USA : John Wiley & Sons, Ltd.
- Ralya, L. L. et Ralya, L. L. (1940). Some significant concepts and beliefs in astronomy and geology of entering freshmen and the relation of these to general scholastic aptitude. *School Science and Mathematics*, 40, 727-734.
- Ranganath, C., Johnson, M. K. et D'Esposito, M. (2000). Left Anterior Prefrontal Activation Increases with Demands to Recall Specific Perceptual Information. *J. Neurosci*, 20(RC108), 1-5.
- Ranganath, C. et Knight, R. T. (2011). *Prefrontal Cortex and Episodic Memory: Integrating Findings from Neuropsychology and Functional Brain Imaging*. Récupéré de http://knightlab.berkeley.edu/statics/publications/2011/04/29/Ranganath_Knight_Prefrontal_cortex_and_episodic_memory.pdf
- Reivich, M., Kuhl, D., Wolf, A., Greenberg, J., Phelps, M., Ido, T., ... Sokoloff, L. (1979). The [18F]-fluorodeoxyglucose method for the measurement of local cerebral glucose utilization in man. *Circulation Research*, 44(1), 127-137.
- Reusser, K. et Stebler, R. (1997). Every word problem has a solution – The social rationality of mathematical modeling in schools. *Learning and Instruction*, 7(4), 309-327.
- Reynolds, J. R., McDermott, K. B. et Braver, T. S. (2006). A Direct Comparison of Anterior Prefrontal Cortex Involvement in Episodic Retrieval and Integration. *Cerebral Cortex*, 16, 519-528. DOI: 10.1093/cercor/bhi131
- Reynolds, A. J. et Walberg, H. J. (1991). A Structural Model of Science Achievement. *Journal of Educational Psychology*, 83(1), 97-107.
- Reynolds, A. J. et Walberg, H. J. (1992). A Structural Model of Science Achievement and Attitude: An Extension to High School. *Journal of Educational Psychology*, 84, 3, 371-382.

- Richter, F. R., Cooper, R. A., Bays, P. M. et Simons, J. S. (2016). Distinct neural mechanisms underlie the success, precision, and vividness of episodic memory. *eLife*, 5, e18260. DOI: 10.7554/eLife.18260
- Robin, J., Hirshhorn, M., Rosenbaum, R. S., Winocur, G., Moscovitch, M. et Grady, C. L. (2014). Functional Connectivity of Hippocampal and Prefrontal Networks During Episodic and Spatial Memory Based on Real-World Environments. *Hippocampus*, 0(0), 1–13. DOI: 10.1002/hipo.22352
- Robinson, A. K., Venkatesh, P., Boring, M. J., Tarr, M. J., Grover, P. et Behrmann, M. (2017). Very high density EEG elucidates spatiotemporal aspects of early visual processing. *Scientific reports*, 7(1), 16248. doi: 10.1038/s41598-017-16377-3
- Roels, S. P., Bossier, H., Loeys, T. et Moerkerke, B. (2015). Data-analytical stability of cluster-wise and peak-wise inference in fMRI data analysis. *Journal of Neuroscience Methods*, 240, 37–47. Récupéré de <http://dx.doi.org/10.1016/j.jneumeth.2014.10.024>
- Roiser, J. P., Linden, D. E., Gorno-Tempini, M. L., Moran, R. J., Dickerson, B. C. et Grafton, S. T. (2016). Minimum statistical standards for submissions to Neuroimage: Clinical. *NeuroImage: Clinical*, 12, 1045–1047. Récupéré de <http://dx.doi.org/10.1016/j.nicl.2016.08.002>
- Roland, P. E. et Gulyás, B. (1995). Visual memory, visual imagery, and visual recognition of large field patterns by the human brain: functional anatomy by positron emission tomography. *Cereb. Cortex*, 5(1), 79-93.
- Roschelle, J. (1991). MicroAnalysis of Qualitative Physics: Opening the Black Box. Affiche présentée au Annual Meeting of the American Educational Research Association, Chicago, Illinois. Récupéré de <http://files.eric.ed.gov/fulltext/ED338490.pdf>
- Rowe, J. B., Toni, I., Josephs, O., Frackowiak, R. S. J. et Passingham, R. E. (2000). The prefrontal cortex: Response selection or maintenance within working memory? *Science*, 288(5471), 1656-1660. DOI: 10.1126/science.288.5471.1656
- Rubia, K., Russell, T., Overmeyer, S., Brammer, M. J., Bullmore, E. T., Sharma, T., ... Taylor, E. (2001). Mapping motor inhibition: Conjunctive brain activations across different versions of Go/No-go and stop tasks. *Neuroimage*, 13(2), 250–261.

- Rugg, M. D. et Allan, K. (2000). Event-related potential studies of long-term memory. Dans E. Tulving et F. I. Craik (dir.), *The Oxford Handbook of Memory* (p. 521–538). Oxford, UK: Oxford UP.
- Rugg, M. D., Fletcher, P. C., Chua, P. M.-L. et Dolan, R. J. (1999). The Role of the Prefrontal Cortex in Recognition Memory and Memory for Source: An fMRI Study. *NeuroImage*, 10, 520–529.
- Rugg, M. D., Fletcher, P. C., Frith, C. D., Frackowiak, R. S. J. et and Dolan, R. J. (1996). Differential activation of the prefrontal cortex in successful and unsuccessful memory retrieval. *Brain*, 119, 2073-2083.
- Rugg, M. D., Fletcher, P. C., Frith, C. D., Frackowiak, R. S. et Dolan, R. J. (1997). Brain regions supporting intentional and incidental memory: A PET study. *Neuroreport*, 8(5), 1283-1287.
- Rugg, M. D., Fletcher, P. C., Frith, C. D., Allan, K., Frackowiak, R. S. J. et and Dolan, R. J. (1998). Neural Correlates of Memory Retrieval during Recognition Memory and Cued Recall. *Neuroimage*, 8, 262–273.
- Rugg, M. D., Henson, R. N. A. et Robb, W. G. K. (2003). Neural correlates of retrieval processing in the prefrontal cortex during recognition and exclusion tasks. *Neuropsychologia*, 41, 40–52.
- Rugg, M. D., Otten, L. J. et Henson, R. N. A. (2002). The neural basis of episodic memory: evidence from functional neuroimaging. *Phil. Trans. R. Soc. Lond. B*, 357, 1097–1110. DOI: 10.1098/rstb.2002.1102
- Rugg, M. D. et Wilding, E. L. (2000). Retrieval processing and episodic memory. *Trends in Cognitive Sciences*, 4(3), 108-115.
- Rusanen, A.-M. (2014). Towards to An Explanation for Conceptual Change: A Mechanistic Alternative. *Science & Education*, 23, 1413-1425. DOI: 10.1007/s11191-013-9656-8
- Rusanen, A.-M. et Lappi, O. (2014). What, When and How do the Models of Conceptual Change Explain? *Proceedings of the 35th annual conference of the cognitive science society* (p. 3331-3336), Berlin, Allemagne.
- Sadler, P. (1987). Misconceptions in astronomy. Dans J. Novak (prés.), *Proceedings of the second international seminar misconceptions and educational strategies in science and mathematics*. (Vol. III, p. 422-425). Ithaca, NY: Cornell University.

- Sadler, P. M., Sonnert, G., Coyle, H. P., Cook-Smith, N. et Miller, J. L. (2013) The Influence of Teachers' Knowledge on Student Learning in Middle School Physical Science Classrooms. *American Educational Research Journal*, 20(10), 1- 30. DOI: 10.3102/0002831213477680.
- Saleh, M., Kao, M.-H. et Pan, R. (sous presse). Design D-optimal event-related functional magnetic resonance imaging experiments. *Journal of the Royal Statistical Society*. Récupéré de: <https://asu.pure.elsevier.com/en/publications/design-d-optimal-event-related-functional-magnetic-resonance-image>
- Saxe, R., Brett, M. et Kanwisher, N. (2006). Divide and conquer: a defense of functional localizers. *Neuroimage*, 30, 1088–1096.
- Saxe, R. R., Whitfield-Gabrieli, S., Scholz, J. ET Pelphey, K. A. (2009). Brain regions for perceiving and reasoning about other people in school-aged children. *Child Development*, 80, 1197–1209. DOI:10.1111/j.1467-8624.2009.01325.x
- Schacter, D. L., Alpert, N. M., Savage, C. R., Rauch, S. L. et Albert, M. S. (1996a). Conscious recollection and the human hippocampal formation: Evidence from positron emission tomography. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 93, 321–325.
- Schacter, D. L., Buckner, R. L., Koutstaal, W., Dale, A. M. et Rosen, B. R. (1997). Late Onset of Anterior Prefrontal Activity during True and False Recognition: An Event-Related fMRI Study. *Neuroimage*, 6, 259–269
- Schacter, D. L., Reiman, E., Curran, T., Yun, L. S., Bandy, D., McDermott, K. B. et Roediger, H. L. (1996b). Neuroanatomical correlates of veridical and illusory recognition memory: Evidence from positron emission tomography. *Neuron*, 17(2), 267-274.
- Schedlbauer, M., Copara, M. S., Watrous, A. J. et & Ekstrom, A. D. (2014). Multiple interacting brain areas underlie successful spatiotemporal memory retrieval in humans. *Scientific Reports*, 4, 6431. DOI: 10.1038/srep06431
- Schibeci, R. A. (1984). Attitudes to science: an update. *Studies in Science Education*, 11, 26–59.
- Schmidt, D., Krause, B. J., Mottaghy, F.M., Halsband, U., Herzog, H., Tellmann, L. et Muller-Gartner, H.-W. (2002). Brain systems engaged in encoding and retrieval of word-pair associates independent of their imagery content or presentation modalities. *Neuropsychologia*, 40, 457–70.
- Schnitz, W., Vosniadou, S. et Carretero, M. (dir.). (1999). *New perspectives on*

conceptual change. Oxford, UK: Pergamon Press.

- Schwedes, H. et Schmidt, D. (1992). Conceptual change: A case study and theoretical comments. Dans R. Duit, F. Goldberg et H. Niedderer (dir.), *Research in physics learning: theoretical issues and empirical studies* (p. 188–202). Kiel, Germany: Institute for Science Education at the University of Kiel.
- Seghier, M. L. (2013). The Angular Gyrus: Multiple Functions and Multiple Subdivisions. *The Neuroscientist*, 19(1), 43–61. DOI: 10.1177/1073858412440596.
- Seghier, M. L., Fagan, E. et Price, C. J. (2010). Functional subdivisions in the left angular gyrus where the semantic system meets and diverges from the default network. *J Neurosci*, 30(50), 16809–16817.
- Sencar, S. et Eryilmaz, A. (2004). Factors mediating the effect of gender on ninth-grade Turkish students' misconceptions concerning electric circuits. *Journal of Research in Science Teaching*, 41(6), 603-616.
- Sequiera, M. et Leite, L. (1991). Alternative Conceptions and History of Science in Physics Teacher Education. *Science Education*, 75(1), 45-56.
- Sestieri, C., Corbetta, M., Romani, G. L. et Shulman, G. L. (2011). Episodic Memory Retrieval, Parietal Cortex, and the Default Mode Network: Functional and Topographic Analyses. *The Journal of Neuroscience*, 31(12), 4407– 4420.
- Setlow, B. et McGaugh, J. L. (1999). Involvement of the Posteroventral Caudate-Putamen in Memory Consolidation in the Morris Water Maze. *Neurobiology of Learning and Memory*, 71, 240–247.
- Shallice, T., Fletcher, P., Frith, C. D., Grasby, P., Frackowiak, R. et Dolan, R. J. (1994). Brain regions associated with acquisition and retrieval of verbal episodic memory. *Nature*, 368(6472), 633-635.
- Shapiro, B. (1989). What children bring to light: giving high status to learner's views and actions in science. *Science education*, 73, 711-733.
- Shattuck, D. W., Mirza, M., Adisetiyo, V., Hojatkashani, C., Salamon, G., Narr, K. L., ... Toga, A. W. (2006). Construction of a 3D probabilistic atlas of human cortical structures. *NeuroImage*, 39, 1064–1080. DOI:10.1016/j.neuroimage.2007.09.031

- She, H.-C. (2001). *Dual situated learning model: An instructional approach toward scientific conceptual change*. Communication présentée aux Proceedings of 2001 Taiwan-Japanese Symposium in Science Education, Taipei, Taiwan.
- She, H.-C. (2004). Fostering Radical Conceptual Change through Dual-Situated Learning Model. *Journal of Research in Science Teaching*, 41(2), 142-164.
- Shimamura, A. P. (2011). Episodic retrieval and the cortical binding of relational activity. *Cogn. Affect. Behav. Neurosci.* 11, 277–291. DOI: 10.3758/s13415-011-0031-4
- Shipstone, D. (1984). A study of children's understanding of electricity in simple DC circuits. *European journal of science education*, 6, 185-198.
- Shipstone, D. (1988). Pupils' understanding of simple electrical circuits. *Physics Education*, 23, 92-96.
- Shipstone, D. (1998). Electricity in simple circuits. Dans R. Driver R., E. Guesne E. et A. Tiberghien (dir.), *Children's Ideas in Science* (pages non spécifiées). Milton Keynes, England: Open University Press.
- Shipstone, D. M. et Gunstone, R. F. (1985). Teaching children to discriminate between current and energy. Dans R. Duit *et al.* (dir.), *Aspects of Understanding Electricity* (p. 287-297). Kiel, Allemagne: Vertrieb Schmidt and Klaunig.
- Shipstone, D. M., Jung, W. et Dupin, J. J. (1988). A study of students' understanding of electricity in five European countries. *International Journal of Science Education*, 10(3), 303-316.
- Shtulman, A. et Harrington, K. (2015). Tensions Between Science and Intuition Across the Lifespan. *Topics in Cognitive Science*, 8, 118–137. DOI: 10.1111/tops.12174
- Shtulman, A. et Valcarcel, J. (2012). Scientific knowledge suppresses but does not supplant earlier intuitions. *Cognition*, 124, 209–215. DOI: 10.1016/j.cognition.2012.04.005
- Simmonds, D. J., Pekar, J. J. et Mostofsky, S. H. (2008). Meta-analysis of Go/No-go tasks demonstrating that fMRI activation associated with response inhibition is task-dependent. *Neuropsychologia*, 46, 224–232.

- Simpson, R. D. et Oliver, J. S. (1990). A summary of the major influences on attitude toward and achievement in science among adolescent students. *Science Education*, 74, 1–18.
- Simons, J. S., Owen, A. M., Fletcher, P. C. et Burgess, P. W. (2003). Anterior prefrontal cortex and the recollection of contextual information. *Neuropsychologia*, 43, 1774–1783.
- Simons, J. S. et Spiers, H. J. (2003). Prefrontal and medial temporal lobe interactions in long-term memory. *Nature Reviews Neuroscience*, 4, 637–648.
- Simons, J. S., Peers, P. V., Hwang, D. Y., Ally, B. A., Fletcher, P. C. et Budson, A. E. (2008). Is the parietal lobe necessary for recollection in humans? *Neuropsychologia*, 46, 1185–1191.
- Sirois, M., Sirois, K., Proulx, S.-P. et Lemelin, S. (2013). Évaluation du TDAH au cabinet : Mode d'emploi pour s'en sortir. *Le Médecin du Québec*, 48(8), 37–44.
- Smolleck, L. et Hershberger, V. (2011). Playing with Science: An Investigation of Young Children's Science Conceptions and Misconceptions. *Current Issues in Education*, 14(1).
- Sohn, M.-H., Goode, A., Stenger, V. A., Carter, C. S. et Anderson, J. R. (2003). Competition and representation during memory retrieval: Roles of the prefrontal cortex and the posterior parietal cortex. *Proc. Nat. Acad. Sc. USA*, 100(12), 7412–7417.
- Solomon, J. (1983). Messy, contradictory, and obstinately persistent: a study of children's out-of-school ideas about energy. *School Science Review*, 65(231), 225–229.
- Sousa, D. A., & Tomlinson, C. A. (2013). *Comprendre le cerveau pour mieux différencier : Adapter l'enseignement aux besoins des apprenants grâce aux apports des neurosciences*. Montréal, Québec : Chenelière.
- Spaniol, J., Davidson, P. S. R., Kim, A. S. N., Han, H., Moscovitch, M. et Grady, C. L. (2009). Event-related fMRI studies of episodic encoding and retrieval: Meta-analyses using activation likelihood estimation. *Neuropsychologia*, 47, 1765–1779.
- Squire, L. R., Bloom, F. E., McConnell, S. K., Roberts, J. L., Spitzer, N. C. et Zigmond, M. J. (2003). *Fundamental Neuroscience* (2e éd.). Londres, UK: Elsevier Science.

- Staresina, B. P., Bauer, H., Deecke, L. et Walla, P. (2005). Neurocognitive correlates of incidental verbal memory encoding: a magnetoencephalographic (MEG) study. *NeuroImage*, 25, 430–443.
- Statistique Canada. (2015). *D'où proviennent les différences entre les résultats scolaires des élèves des écoles secondaires publiques et ceux des élèves des écoles secondaires privées?* Récupéré de <http://www.statcan.gc.ca/pub/11f0019m/11f0019m2015367-fra.htm>
- Stavy, R. (1990). Children's conception of changes in the state of matter: From liquid (or solid) to gas. *Journal of Research in Science Teaching*, 27(3), 247-266.
- Stavy, R. et Babai, R. (2008). Complexity of Shapes and Quantitative Reasoning in Geometry. *Mind, Brain and Education*, 2(4), 170-176.
- Stavy, R. et Babai, R. (2010). Overcoming intuitive interference in mathematics: insights from behavioral, brain imaging and intervention studies. *ZDM Mathematics Education*, 42, 621–633. DOI: 10.1007/s11858-010-0251-z
- Stavy, R., Babai, R., Tsamir, P., Tirosh, D., Lai-Lin F. et McRobbie, C. (2006). Are intuitive rules universal? *International Journal of Science and Mathematics Education*, 4, 417-436.
- Stavy, R. et Tirosh, D. (2000). *How students (mis-) understand science and mathematics: Intuitive rules*. New York: Teachers College Press.
- Steffe L. P. et Gale J. (1995) *Constructivism in education*. Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum.
- Stevens, W. D. et Grady, C. L. (2007). Functional Neuroimaging Studies of Episodic Memory. Dans B. L. Miller et J. L. Cummings (dir.), *The Human Frontal Lobes: Functions and Disorders* (p. 207-226). New York, NY: Guilford Press.
- Stillings, N. A. (1995). *Cognitive science: An introduction*. Cambridge, Mass.: MIT Press.
- Strike, K. A. et Posner, G. J. (1985). A conceptual change view of learning and understanding. Dans L. West et L. Pines (dir.), *Cognitive structure and conceptual change* (p. 211-231). New York, NY: Academic Press.
- Strike, K. A. et Posner, G. J. (1992). A revisionist theory of conceptual change. Dans R. A. Duschl et R. J. Hamilton (dir.), *Philosophy of science, cognitive psychology, and educational theory and practice* (p. 147-176). New York, NY: State University of New York Press.

- Summers, M., Kruger, C. et Mant, J. (1998). Teaching electricity effectively in the primary school: a case study. *International Journal of Science Education*, 20(2), 153-172.
- Svandova, K. (2014). Secondary School Students' Misconceptions about Photosynthesis and Plant Respiration: Preliminary Results. *Eurasia Journal of Mathematics, Science & Technology Education*, 10(1), 59-67.
- Taber, K. S., de Trafford, T. et Quail, T. (2006). Conceptual resources for constructing the concepts of electricity: the role of models, analogies and imagination. *Physics Education*, 41(2), 155-160.
- Tafer, N., Ferraty, M., Del Campo Fuentes, I., Desnoyes, P. et Mauriat, P. (2011). Nouvelles techniques de monitoring cérébral en réanimation pédiatrique — spectroscopie proche infrarouge (NIRS). *Réanimation*, 20, S650-S654. DOI: 10.1007/s13546-010-0044-y
- Talairach, J. et Tournoux, P. (1988). *Co-planar Stereotaxic Atlas of the Human Brain*. Stuttgart: Thieme.
- Thagard, P. (1991). Concepts and conceptual change. Dans J. H. Fetzer (dir.), *Epistemology and cognition* (p. 101–120). Dordrecht: Kluwer.
- Thagard, P. (1992). *Conceptual Revolution*. Princeton, NJ: Princeton University Press.
- The Royal Society. (2011). *Neuroscience: Implications for education and lifelong learning*. Londres, UK: The Royal Society.
- Thibault, F. (2013). *Étude du rôle de l'inhibition dans le changement conceptuel à l'égard du concept de force chez des étudiants universitaires*. (Mémoire de maîtrise, Université du Québec à Montréal). Récupéré de <http://www.archipel.uqam.ca/7340/1/M13093.pdf>
- Thompson, F. et Logue, S. (2006). An exploration of common student misconceptions in science. *International Education Journal*, 7(4), 553-559.
- Thouin, M. (1996). *Notions de culture scientifique et technologique: concepts de base, percées historiques et conceptions fréquentes*. Sainte-Foy, Québec : Éditions MultiMondes.
- Thouin, M. (2009). *Enseigner les sciences et les technologies au préscolaire et au primaire*. Québec, Québec: Éditions Multimondes.

- Tiberghien, A. (1994). Modeling as a basis for analyzing teaching–learning situations [special issue]. *Learning and Instruction*, 4, 71–87.
- Tiffany A. Koszalka, T. A. (2002). Technology Resources as a Mediating Factor in Career Interest Development. *Educational Technology & Society*, 5, 2.
- Tong, Y., Chen, Q., Nichols, T. E., Rasetti, R., Callicott, J. H., Berman, K. F., Weinberger, D. R. et Mattay, V. S. (2016). Seeking Optimal Region-Of-Interest (ROI) Single-Value Summary Measures for fMRI Studies in Imaging Genetics. *PLoS One*, 11(3), e151-391. DOI: 10.1371/journal.pone.0151391
- Toussaint, R. (1991). Les représentations préscientifiques chez des adolescents. *Revue de l'Université de Moncton*, 23(1/2), 29-49.
- Toussaint, R. (2001). *Changement conceptuel et apprentissage des sciences*. Outremont: Éditions Logique.
- Treagust, D. F. (1988). Development and use of diagnostic tests to evaluate students' misconceptions in science. *International Journal of Science Education*, 10(2). DOI: 10.1080/0950069880100204
- Treagust, D. F et Duit, R. (2008). Conceptual change: A discussion of theoretical, methodological and practical challenges for science education. *Cultural Studies of Science Education*, 3(2), 297–328.
- Trinkler, I., King, J. A., Doeller, C. F., Rugg, M. D. et Burgess, N. (2009). Neural Bases of Autobiographical Support for Episodic Recollection of Faces. *Hippocampus*, 19(8), 718-30. DOI: 10.1002/hipo.20556
- Tsai, C.-C. (2003). Using a conflict map as an instructional tool to change student alternative conceptions in simple series electric-circuits. *International Journal of Science Education*, 25(3), 307-327. DOI: 10.1080/09500690210145756
- Tulving, E., Kapur, S., Craik, F. I. M., Moscovitch, M. et Houle, S. (1994). Hemispheric encoding/retrieval asymmetry in episodic memory: Positron emission tomography findings. *Proc. Nati. Acad. Sci. USA*, 91, 2016-2020.
- Tulving, E., Markowitsch, H. J., Craik, F. I. M., Habib, R. et Houle, S. (1996). Novelty and Familiarity Activations in PET Studies of Memory Encoding and Retrieval. *Cerebral Cortex*, 6, 71-79.
- Tulving, E. et Thomson, D. M. (1971). Retrieval processes in recognition memory : effects of associative context. *Journal of Experimental Psychology*, 87(1), 116-124.

- Turkeltaub, P. E., Eden, G. F., Jones, K. M. et Zeffiro, T. A. (2002). Meta-analysis of the functional neuroanatomy of single-word reading: method and validation. *Neuroimage*, 16, 765–80.
- Tyson, L. M., Grady, J., Venville, A., Harrison, G. et Treagust, D. F. (1997). A Multidimensional Framework for Interpreting Conceptual Change Events in the Classroom. *Science Education*, 81(4), 387–404.
- Tytler, R. et Prain, V. (2010). A Framework for Re-thinking Learning in Science from Recent Cognitive Science Perspectives. *International Journal of Science Education*, 32(15), 2055-2078. DOI: 10.1080/09500690903334849
- Tzourio-Mazoyer, N., Landeau, B., Papathanassiou, D., Crivello, F., Etard, O., Delcroix, N., Mazoyer, B. et Joliot, M. (2002). Automated anatomical labeling of activations in SPM using a macroscopic anatomical parcellation of the MNI MRI single-subject brain. *Neuroimage*, 15, 273–89.
- UNESCO. (2010). *UNESCO science report 2010: The current status of science around the world*. Récupéré de <http://unesdoc.unesco.org/images/0018/00189/189958e.pdf>
- van Duijvenvoorde, A. C. K., Zanolie, K., Rombouts, S. A. R. B., Raijmakers, M. E. J. et Crone, E. A. (2008). Evaluating the Negative or Valuing the Positive? Neural Mechanisms Supporting Feedback-Based Learning across Development. *The Journal of Neuroscience*, 28(38), 9495–9503.
- Van Essen, D. C., Dierker, D., Snyder, A. Z., Raichle, M. E., Reiss, A. L. et Korenberg, J. (2006). Symmetry of cortical folding abnormalities in Williams syndrome revealed by surface-based analyses. *J. Neurosci.*, 26(20), 5470–5483.
- van Veen, V. et Carter, C. S. (2002). The anterior cingulate as a conflict monitor: fMRI and ERP studies. *Physiology & Behavior*, 77, 477–482.
- Velanova, K., Jacoby, L. L., Wheeler, M. E., McAvoy, M. P., Petersen, S. E. et Buckner, R. L. (2003). Functional–Anatomic Correlates of Sustained and Transient Processing Components Engaged during Controlled Retrieval. *The Journal of Neuroscience*, 23(24), 8460–8470.
- Vendrell, P., Junqui, C., Pujol, J., Jurado, A., Molet, J. et Grafman, J. (1995). Role of prefrontal regions in the Stroop task. *Neuropsychologia*, 33(3), 341-352.
- Viard, J. et Langlois, F. K. (2001). The concept of electrical resistance: How Cassirer's philosophy, and the early developments of electric circuit theory,

- allow a better understanding of students' learning difficulties. *Science & Education*, 10, 267-286.
- Vilberg, K. L., Rugg, M. D. (2007). Dissociation of the neural correlates of recognition memory according to familiarity, recollection, and amount of recollected information. *Neuropsychologia*, 45, 2216–2225.
- Vilberg, K. L. et Rugg, M. D. (2008). Memory retrieval and the parietal cortex: a review of evidence from a dual-process perspective. *Neuropsychologia*, 46(7), 1787–1799. DOI : 10.1016/j.neuropsychologia.2008.01.004.
- Vilberg, K. L. et Rugg, M. D. (2012). The Neural Correlates of Recollection: Transient Versus Sustained fMRI Effects. *The Journal of Neuroscience*, 32(45), 15679-15687.
- Villani, A. (1992). Conceptual change in science and science education. *Science Education*, 76(2), 223-237.
- Vosniadou, S. (2007). The Conceptual Change Approach and Its Re-Framing. Dans S. Vosniadou, A. Baltas et X. Vamvakoussi (dir.), *Advances in Learning and Instruction Series: Reframing the Conceptual Change Approach in Learning and Instruction* (p. 1–15). Amsterdam, Pays-Bas: Elsevier Science.
- Vosniadou, S. (dir.). (2008). *International handbook of research on conceptual change*. New York, NY: Routledge.
- Vosniadou, S. (2009). 'Conceptual Metaphor Meets Conceptual Change': Yes to Embodiment, No to Fragmentation. *Human Development*, 52, 198-204.
- Vosniadou, S. (2012). Reframing the classical approach to conceptual change: Preconceptions, misconceptions and synthetic models. Dans B. J. Fraser, K. Tobin et C. J. McRobbie (Dir.), *Second International Handbook of Science Education* (p. 119-130). Dordrecht, Pays-Bas: Springer.
- Vosniadou, S. (dir.). (2013). *International handbook of research on conceptual change* (2e éd.). New York, NY: Routledge.
- Vosniadou, S. (2014). Examining cognitive development from a conceptual change point of view: The framework theory approach. *European Journal of Developmental Psychology*, 11(6), 645-661. DOI: 10.1080/17405629.2014.921153
- Vosniadou, S. et Brewer, W. F. (1992). Mental models of the earth: A study of conceptual change in childhood. *Cognitive Psychology*, 24, 35–585.

- Vosniadou, S. et Brewer, W. F. (1994). Capturing and modeling the process of conceptual change. *Learning and Instruction*, 4(1), 45-69. DOI: 10.1016/0959-4752(94)90018-3
- Vosniadou, S., Ioannides, C., Dimitrakopoulou, A. et Papademetriou, E. (2001). Designing learning environments to promote conceptual change in science. *Learning and Instruction*, 11, 381-419.
- Vosniadou, S. et Skopeliti, I. (2014). Conceptual Change from the Framework Theory Side of the Fence. *Science & Education*, 23(7), 1427-1445.
- Vosniadou, S., Vamvakoussi, X. et Skopeliti, I. (2013). The Framework Theory Approach to the Problem of Conceptual Change. Dans S. Vosniadou (dir.), *International handbook of research on conceptual change* (p. 3-34). New York, NY: Taylor & Francis.
- Wager, T. D. et Nichols, T. H. (2003). Optimization of experimental design in fMRI: a general framework using a genetic algorithm. *NeuroImage*, 18, 293-309.
- Wager, T. D., Sylvester, C.-Y. C., Lacey, S. C., Nee, D. E., Franklin, M. et Jonides, J. (2005). Common and unique components of response inhibition revealed by fMRI. *NeuroImage*, 27, 323-340.
- Wagner, A. D., Poldrack, R. A., Eldridge, L. L., Desmond, J. E., Glover, G. H. et Gabrieli, J. D. E. (1998). Material-specific lateralization of prefrontal activation during episodic encoding and retrieval. *NeuroReport*, 9, 3711-3717.
- Wagner, A. D., Shannon, B. J., Kahn, I. et Buckner, R. L. (2005). Parietal lobe contributions to episodic memory retrieval. *Trends in Cognitive Sciences*, 9(9), 445-453. DOI: 10.1016/j.tics.2005.07.001
- Wandersee, J. H., Mintzes, J. J. et Novak, J. D. (1994). Research on alternative conceptions in science. Dans D. L. Gabel (dir.), *Handbook of Research on Science Teaching and Learning* (p. 177-210). New York, NY: MacMillan.
- Wang, L., Kakigi, R. et Hoshiyama, M. (2001). Neural activities during Wisconsin Card Sorting Test – MEG observation. *Brain Research: Cognitive Brain Research*, 12, 19-31.
- Watanabe, J., Sugiura, M., Sato, K., Sato, Y., Maeda, Y., Matsue, Y., Fukuda, H. et Kawashima, R. (2002). The human prefrontal and parietal association cortices are involved in NO-GO performances: An event-related fMRI study. *Neuroimage*, 17(3), 1207-1216.

- Weerakkody, R. A., Czosnyka, M., Zweifel, C., Castellani, G., Smielewski, P., Brady, K., Pickard, J. D. et Czosnyka, Z. (2012). Near infrared spectroscopy as possible non-invasive monitor of slow vasogenic ICP waves. *Acta Neurochir. Suppl.*, 114, 181–185. DOI : 10.1007/s00701-010-0748-9
- Weinburgh, M. (1995). Gender differences in student attitudes toward science: a meta-analysis of the literature from 1970 to 1991. *Journal of Research in Science Teaching*, 32, 387–398.
- Wheeler, M. E. et Buckner, R. L. (2003). Functional Dissociation among Components of Remembering: Control, Perceived Oldness, and Content. *The Journal of Neuroscience*, 23(9), 3869–3880.
- Wheeler, M. E. et Buckner, R. L. (2004). Functional–anatomic correlates of remembering and knowing. *Neuroimage*, 21, 1337–1349.
- Windschitl, M. (2001). Using Simulations in the Middle School: Does Assertiveness of Dyad Partners Influence Conceptual Change? *International Journal of Science Education*, 23(1), 17-32. DOI: 10.1080/09500690121082
- Wiser, M. et Amin, T. (2001) “Is heat hot?” Inducing conceptual change by integrating everyday and scientific perspectives on thermal phenomena. *Learning and Instruction*, 11, 331–355.
- Wixted, J. T. (2004). The psychology and neuroscience of forgetting. *Annu Rev Psychol.*, 55, 235-69. DOI: 10.1146/annurev.psych.55.090902.141555
- Wodka, E. L., Mahone, E. M., Blankner, J. G., Larson, J. C, Fotedar, S., Denckla, M. B. et Mostofsky, S. H. (2007) Evidence that response inhibition is a primary deficit in ADHD. *J Clin Exp Neuropsychol.*, 29(4), 345-356.
- Woo, C. W., Krishnan, A. et Wager, T. D. (2014). Cluster-extent based thresholding in fMRI analyses: pitfalls and recommendations. *NeuroImage*, 91, 412–419.
- Worsley, K. J., Liao, C. H., Aston, J., Petre, V., Duncan, G. H., Morales, F. et Evans, A. C. (2002). A general statistical analysis for fMRI data. *NeuroImage*, 15, 1–15. Récupéré de [http:// dx.doi.org/10.1006/nimg.2001.0933](http://dx.doi.org/10.1006/nimg.2001.0933).
- Worsley, K. J., Marrett, S., Neelin, P., Vandal, A. C., Friston, K. J. et Evans, A. C. (1996). A unified statistical approach for determining significant signals in images of cerebral activation. *Hum. Brain Mapp.*, 4, 58-73.

- Worsley, K. J., Taylor, J. E., Tomaiuolo, F. et Lerch, J. (2004). Unified univariate and multivariate random field theory. *NeuroImage*, 23(Suppl. 1), S189–195. Récupéré de à <http://dx.doi.org/10.1016/j.neuroimage.2004.07.026>.
- Yaman, M., Gerçek, S., & Soran, H. (2008). Analysis of biology teacher candidates' occupational interests in terms of different variables. *Hacettepe University Journal of Education*, 35, 351–361.
- Yantis, S. (2000). Goal-directed and stimulus-driven determinants of attentional control. Dans S. Monsell et J. Driver (dir.), *Attention and performance XVIII* (p. 73-103). Cambridge, MA: MIT Press.
- Yeung, N., Botvinick, M. M. et Cohen, J. D. (2004). The neural basis of error-detection: Conflict monitoring and the error-related negativity. *Psychological Review*, 111, 931–959.
- Yonelinas, A. P. (1997). Recognition memory ROCs for item and associative information: The contribution of recollection and familiarity. *Memory & Cognition*, 25(6), 747–763.
- Yonelinas, A. P. (1999). The contribution of recollection and familiarity to recognition and source-memory judgments: A formal dual-process model and an analysis of receiver operating characteristics. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 25(6), 1415–1434.
- Yonelinas, A. P. (2002). The nature of recollection and familiarity: A review of 30 years of research. *Journal of Memory and Language*, 46, 441–517.
- Yonelinas, A. P., Kroll, N. E. A., Dobbins, I. G. et Soltani, M. (1999). Recognition memory of faces: When familiarity supports associative recognition judgments. *Psychonomic Bulletin & Review*, 6(4), 654–661.
- Yonelinas, A. P., Otten, L. J., Shaw, K. N. et Rugg, M. D. (2005). Separating the brain regions involved in recollection and familiarity in recognition memory. *Journal of Neuroscience*, 25, 3002–3008.
- Yoshida, H., Verschaffel, L. et De Corte, E. (1997). Realistic considerations in solving problematic word problems: do Japanese and Belgian children have the same difficulties? *Learning and Instruction*, 7, 329–338.
- Zaitchik, D. et Solomon, G. E. A. (2008). Animist thinking in the elderly and in patients with Alzheimer's disease. *Cognitive Neuropsychology*, 25(1), 27-3.

- Zaitchik, D. et Solomon, G. E. A. (2009). Conservation of *species*, *volume*, and *belief* in patients with Alzheimer's disease: the issue of domain-specificity and conceptual impairment. *Cogn Neuropsychol.*, 26(6), 511–526. DOI: 10.1080/02643290903478549.
- Zirbel, E. L. (2004). Framework for conceptual change. *The Astronomy Education Review*, 3(1), 62-76.
- Zysset, S., Huber, O., Ferstl, E. et von Cramon, D. Y. (2002). The Anterior Frontomedian Cortex and Evaluative Judgment: An fMRI Study. *NeuroImage*, 15, 983–991. DOI: 10.1006/nimg.2001.1008
- Zysset, S., Müller, K., Lohmann, G. et von Cramon, D. Y. (2001). Color Word Matching Stroop Task: Separating Interference and Response Conflict. *NeuroImage*, 13, 29–36. DOI: 10.1006/nimg.2000.066