

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL

INHIBITION ET CAPACITÉ À SURMONTER CERTAINES CONCEPTIONS
ALTERNATIVES EN CHIMIE

MÉMOIRE

PRÉSENTÉ

COMME EXIGENCE PARTIELLE
DE LA MAÎTRISE EN ÉDUCATION

PAR

GUILLAUME MALENFANT-ROBICHAUD

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

La rédaction d'un mémoire représente un défi personnel et intellectuel d'une telle ampleur qu'il aurait été impossible de l'accomplir sans l'incalculable contribution de ces personnes que j'ai l'honneur de côtoyer. J'espère que ces quelques mots sauront témoigner de ma reconnaissance et de tout l'amour que je vous porte.

Tout d'abord, un immense merci à mon directeur Steve Masson et à mon codirecteur Patrice Potvin pour leurs judicieux conseils et leur dévouement pour garantir la réussite de ce projet. Vous avez été des mentors incroyables et une inspiration constante tout au long de cette aventure. Votre rigueur et votre grande humanité ont grandement contribué à l'ambiance unique au sein de notre équipe de recherche en plus d'avoir fait de moi bien plus qu'un meilleur chercheur.

Tous mes remerciements à Caroline Cormier d'avoir accepté de collaborer à ce projet et d'y avoir mis autant d'énergie et de talent. Ta joie de vivre et ton dynamisme n'ont d'égal que ta vivacité et la qualité de tes commentaires. Ta contribution m'aura permis de traverser plusieurs difficultés avec un immense plaisir.

Je suis aussi extrêmement reconnaissant de l'apport de tous les enseignants de la maîtrise à l'Université du Québec à Montréal et particulièrement Christian Bégin et Anastassis Kozanitis pour leur travail dans mon comité d'évaluation. Leurs précieux conseils ont contribué à améliorer ce mémoire en plus d'aiguiser mes habiletés de chercheur.

Un merci tout spécial aux participants qui ont accepté de prendre part à cette recherche. Nos discussions et votre intérêt pour le projet et ses retombées pédagogiques auront été une grande source de motivation et auront confirmé l'intérêt d'étudier cette question.

J'aimerais aussi souligner la contribution financière du Conseil de recherche en sciences humaines du Canada, du Fonds québécois de recherche sur la société et la culture, de la Fondation de l'UQAM et de l'Équipe de recherche en éducation scientifique et technologique. Votre confiance en moi aura été un encouragement encore plus fort que l'argent que vous m'avez remis.

Des remerciements plus personnels à tous les étudiants de la maîtrise qui ont rendu mon parcours beaucoup plus agréable. Le mélange de nos multiples parcours et projets de recherche aura été d'une grande richesse pour ma formation. J'aimerais aussi remercier tous les membres de l'EREST d'avoir été des collègues et amis exceptionnels. Vous avez rendu ce parcours encore plus divertissant et enrichissant.

Merci aussi à tous mes amis pour votre présence et votre faculté à me remémorer l'essentiel. Vous m'avez aidé à naviguer à travers toutes les péripéties et les moments plus difficiles.

Un merci tout spécial à mes parents Lise Malenfant et Pierre Robichaud pour leurs encouragements et leur soutien tout au long de mes études. J'aimerais surtout vous remercier de m'avoir donné le goût d'apprendre et de m'avoir transmis les outils pour y parvenir. Vous m'avez fait le plus beau des cadeaux et je vous en serai éternellement reconnaissant.

Tous ces remerciements auraient été vains sans le soutien inconditionnel de Jennifer Grégoire. Merci, mon amour, d'avoir été à mes côtés dans les hauts et les bas et de m'avoir donné l'opportunité de poursuivre mes rêves malgré les nombreux sacrifices. Merci d'ajouter de la spontanéité dans ma vie et d'être celle qui m'inspire le plus à devenir une meilleure personne.

À tous les enseignants qui forment les cerveaux de demain

TABLE DES MATIÈRES

LISTE DES FIGURES.....	xi
LISTE DES TABLEAUX.....	xiii
LISTE DES ABRÉVIATIONS.....	xv
RÉSUMÉ	xvii
INTRODUCTION	1
CHAPITRE I PROBLÉMATIQUE.....	3
1.1 Importance de la culture scientifique.....	3
1.2 Conceptions alternatives des élèves.....	5
1.3 Changement conceptuel.....	8
1.4 Apport de la neuroéducation dans le changement conceptuel.....	12
1.5 Question de recherche.....	16
CHAPITRE II CADRE THÉORIQUE.....	19
2.1 Conceptions alternatives et changement conceptuel	20
2.1.1 Des conceptions alternatives aux concepts scientifiques	20
2.1.2 Changement conceptuel	24
2.1.3 Modèles de changement conceptuel.....	27
2.2 Inhibition.....	39
2.2.1 Définition de l'inhibition.....	40
2.2.2 Régions cérébrales associées à l'inhibition.....	42
2.2.3 Inhibition et apprentissage	50

2.3	Hypothèse de recherche	67
CHAPITRE III MÉTHODOLOGIE.....		69
3.1	Participants.....	69
3.1.1	Critères généraux de sélection.....	69
3.1.2	Modalités de recrutement et échantillonnage final.....	70
3.2	Collecte de données.....	71
3.2.1	Justification de l'IRMf comme technique d'imagerie cérébrale	71
3.2.2	Description de la tâche cognitive.....	74
3.2.3	Description d'une séance d'IRMf.....	79
3.3	Analyse des données	82
3.3.1	Prétraitement des données cérébrales	82
3.3.2	Traitement des données	84
3.4	Considérations éthiques	86
3.4.1	Considérations associées à l'utilisation de l'IRMf.....	86
3.4.2	Obtention du consentement éclairé.....	87
3.4.3	Précautions pour respecter la confidentialité.....	87
CHAPITRE IV RÉSULTATS.....		89
4.1	Résultats comportementaux	89
4.1.1	Exactitude des réponses.....	89
4.1.2	Temps de réponse	90
4.2	Résultats cérébraux	91
CHAPITRE V DISCUSSION DES RÉSULTATS		95
5.1	Interprétation des résultats	95
5.1.1	Résultats comportementaux.....	96
5.1.2	Résultats cérébraux.....	97
5.2	Limites de l'étude.....	103
5.3	Retombées de l'étude	105

5.3.1 Retombées sur les recherches sur le changement conceptuel	105
5.3.2 Retombées sur l'enseignement des sciences	107
CHAPITRE VI CONCLUSION	111
APPENDICE A FORMULAIRE DE CONSENTEMENT	115
APPENDICE B FORMULAIRE DE DÉPISTAGE	123
APPENDICE C INVITATION ENVOYÉE AUX PARTICIPANTS	127
APPENDICE D ÉNONCÉS DE LA TÂCHE COGNITIVE.....	129
APPENDICE E PARAMÈTRES D'ACQUISITION DES IMAGES ANATOMIQUES ET FONCTIONNELLES	137
RÉFÉRENCES.....	139

LISTE DES FIGURES

Figure	Page
2.1 Modèles cognitifs du développement. A. Modèle piagétien en escalier et B. Modèle dynamique non-linéaire (Tiré de Lubin, Lanoë, Pineau et Rossi, 2012).	42
2.2 Régions cérébrales associées au cortex cingulaire antérieur (24, 25, 32 et 33) (Tiré de Mirabella, 2014, p.6).....	46
2.3 Régions cérébrales associées au cortex préfrontal dorsolatéral (46 et 9) et ventrolatéral (45 et 47) (Tiré de Mirabella, 2014, p. 6)	48
3.1 Représentation d'un bloc de la tâche	76
3.2 Représentation d'une session de la tâche.....	76
4.1 Régions significativement activées lors de l'évaluation des paires dont les deux énoncés ont été correctement évalués (incongruent > congruent; $p < 0,001$ non corrigé; minimum 8 voxels; analyse à effets aléatoires)	93

LISTE DES TABLEAUX

Tableau

Page

3.1	Synthèse des caractéristiques de l'échantillon final (n = 17).....	71
3.2	Critères à respecter pour justifier l'inclusion des énoncés de la tâche	79
4.1	Exactitude des participants pour les stimuli congruents et incongruents	90
4.2	Temps de réponse des participants (en ms) pour les paires dont les deux énoncés ont été correctement évalués	91
4.3	Régions cérébrales significativement plus activées lors de l'évaluation des paires dont les deux énoncés ont été correctement évalués	92
D.1	Liste des énoncés de la tâche cognitive	131
D.2	Liste des stimuli de la séance de pratique	136

LISTE DES ABRÉVIATIONS

AMS	Aire motrice supplémentaire
CCA	Cortex cingulaire antérieur
CPDL	Cortex préfrontal dorsolatéral
CPVL	Cortex préfrontal ventrolatéral
CSÉ	Conseil supérieur de l'éducation
EEG	Électroencéphalographie
IO	Imagerie optique
IUGM	Institut universitaire de gériatrie de Montréal
IRMf	Imagerie par résonance magnétique fonctionnelle
MEG	Magnétoencéphalographie
MELS	Ministère de l'Éducation, du Loisir et du Sport
OCDE	L'Organisation de coopération et de développement économiques
PISA	Programme international pour le suivi des acquis des élèves
PPCE	Programme pancanadien d'évaluation
SMT	Stimulation magnétique transcrânienne

TEP Tomographie par émission de positrons

UNF Unité de neuroimagerie fonctionnelle

RÉSUMÉ

Les chercheurs en éducation sont conscients des nombreuses difficultés pouvant entraver l'apprentissage des sciences. Parmi celles-ci, la présence de conceptions alternatives dans le raisonnement des élèves occupe une place importante dans les recherches. Il est en effet reconnu que les conceptions alternatives des élèves sont variées et qu'elles peuvent résister aux stratégies d'enseignement traditionnelles (Liu, 2001; Wandersee, Mintzes et Novak, 1994). Les chercheurs ont alors grandement étudié le changement conceptuel qui décrit « les parcours d'apprentissage des élèves de leurs conceptions initiales vers les concepts scientifiques à apprendre. » (Duit, 1999, cité dans Duit et Treagust, 2003, p. 673, traduction libre).

Cependant, aucun modèle ne parvient à faire consensus (diSessa, 2008, 2008; Rusanen, 2014). Qui plus est, plusieurs de ces modèles divergent sur plusieurs considérations importantes telles que l'avenir des conceptions alternatives après le changement conceptuel (Potvin, 2017). Pour certains, un changement conceptuel réussi entraîne le remplacement (p. ex. Posner, Strike, Hewson et Gertzog, 1982) ou la transformation de la conception alternative (p. ex. Vosniadou, 1994; Chi, Slotta et De Leeuw, 1994). Pour d'autres, il s'agit plutôt d'une compétition entre la conception alternative et le concept scientifique (e.g. Mortimer, 1995; Potvin, 2013).

Des études récentes ayant utilisé les temps de réponse semblent toutefois indiquer que les conceptions alternatives ne sont pas effacées après le changement conceptuel et qu'elles coexistent avec les conceptions scientifiques (Babai et Amsterdamer, 2008; Babai, Sekal, et Stavy, 2010; Kelemen, Rottman, et Seston, 2012; Potvin et Cyr, 2017; Shtulman et Harrington, 2015). D'autres études ont renforcé cette hypothèse en analysant l'activité cérébrale associée à l'expertise en physique grâce à l'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle (IRMf) (Brault Foisy, Potvin, Riopel et Masson, 2015; Masson, Potvin, Riopel et Brault Foisy, 2014). Leurs résultats ont montré que l'activation dans les régions cérébrales reliées à l'inhibition était significativement plus importante chez les experts que chez les novices. Les auteurs concluent ainsi que les experts doivent inhiber leurs conceptions alternatives pour répondre correctement à des tâches contre-intuitives.

Toutefois, il est encore incertain si l'inhibition contribue aussi à l'expertise en chimie. Pour valider cette hypothèse, une tâche cognitive en chimie a été élaborée et utilisée lors d'une étude en IRMf auprès de 19 enseignants en chimie de niveau collégial et

universitaire. Cette tâche consistait en 40 paires de stimuli en lien avec différentes conceptions alternatives en chimie. Chaque paire était formée d'un énoncé congruent avec la conception alternative et d'un énoncé incongruent qui nécessite de surmonter la conception alternative pour répondre correctement.

L'exactitude des réponses, le temps de réponse et l'activité cérébrale ont été mesurés et analysés. Des différences significatives ont été observées dans l'exactitude et les temps de réponse entre les énoncés congruents et incongruents. De plus, l'analyse de l'activité cérébrale lors de l'évaluation des énoncés incongruents révèle une activation plus importante dans le cortex préfrontal dorsolatéral, dans la partie antérieure de l'aire motrice supplémentaire (pré-AMS) et dans le cortex préfrontal ventrolatéral gauche/insula antérieure gauche. Ces trois régions cérébrales sont fréquemment activées dans plusieurs tâches d'inhibition (Laird *et al.*, 2005; Nozari, Mirman et Thompson-Schill, 2016; Simmonds, Pekar et Mostofsky, 2008).

Les résultats viennent donc appuyer l'hypothèse de la coexistence des conceptions et du rôle de l'inhibition dans l'expertise en chimie. Plusieurs modèles de changement conceptuel gagneraient donc à être repensés pour s'harmoniser avec les conséquences de la coexistence des conceptions. L'enseignement des sciences se voit aussi influencé par les résultats de cette étude. En effet, les enseignants devront probablement revoir leurs stratégies d'enseignement afin de favoriser la prévalence de la conception scientifique (Potvin, 2013, 2017). De nouvelles stratégies pourront aussi être proposées afin d'aider les élèves à développer leur capacité à inhiber (Houdé *et al.*, 2000, 2001).

Mots-clés : changement conceptuel, éducation scientifique, chimie, inhibition, IRMf, neuroéducation.

INTRODUCTION

Depuis plusieurs années, les chercheurs en didactique des sciences se sont grandement intéressés aux conceptions alternatives des élèves. La dernière version de la bibliographie de Pfundt et Duit (2009) contient d'ailleurs plus de 8000 références sur ce sujet. De nombreux chercheurs ont aussi tenté de concevoir un modèle de changement conceptuel permettant d'expliquer la difficulté des élèves à acquérir certains concepts scientifiques. Malheureusement, aucun modèle ne parvient à faire consensus, ce qui nuit à l'application des stratégies d'enseignement émanant de ces recherches.

Toutefois, l'émergence de la neuroéducation semble apporter un éclairage nouveau sur la question. Croisement entre les recherches en éducation et en neuroscience, la neuroéducation cherche à analyser une nouvelle variable en éducation : le niveau cérébral. À l'aide de protocoles expérimentaux optimisés pour répondre aux préoccupations éducatives, la neuroéducation vise à développer de nouveaux savoirs grâce aux méthodes et aux connaissances provenant des neurosciences. Cette approche a d'ailleurs permis de souligner le rôle de l'inhibition dans l'expertise en physique (Brault Foisy, Potvin, Riopel et Masson, 2015; Masson, Potvin, Riopel et Brault Foisy, 2014). Cette recherche s'inscrit aussi dans ce courant de recherche et tentera de déterminer, à l'aide de l'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle, si les experts en chimie ont besoin d'inhiber leurs conceptions alternatives.

Ce mémoire comporte six chapitres. Le premier chapitre présente la problématique et la pertinence sociale et scientifique de l'étude en plus d'introduire la question de recherche. Le second chapitre, consacré au cadre théorique, détaillera les concepts

centraux de la recherche : le changement conceptuel et l'inhibition. Plusieurs études ayant étudié l'inhibition et l'apprentissage seront aussi présentées et permettront la formulation d'une hypothèse de recherche. La méthodologie sera ensuite précisée dans le troisième chapitre en décrivant les modalités de recrutement, la collecte et l'analyse des données et les considérations éthiques. Le quatrième chapitre présente les principaux résultats de la recherche qui seront analysés et interprétés dans le cinquième chapitre. La discussion portera sur la concordance des résultats avec l'hypothèse de recherche ainsi que sur les limites et les retombées de l'étude. Finalement, le dernier chapitre offrira un résumé des conclusions de l'étude en plus de présenter quelques pistes de réflexion pouvant guider les prochaines recherches visant à approfondir notre compréhension du changement conceptuel en chimie.

CHAPITRE I

PROBLÉMATIQUE

Ce premier chapitre présente la problématique de la recherche. Une première section discutera de l'importance de la culture scientifique dans la société avant d'aborder les conceptions alternatives qui constituent une difficulté majeure nuisant à l'enseignement des concepts scientifiques. Ensuite, les limites des recherches sur le changement conceptuel, notamment sur l'avenir des conceptions, seront présentées. Pour conclure, quelques recherches seront mentionnées afin d'illustrer l'apport de la neuroéducation et de l'inhibition dans le changement conceptuel en physique ainsi que les quelques résultats prometteurs qui incitent à se concentrer sur la chimie.

1.1 Importance de la culture scientifique

La science occupe une place prédominante dans nos vies (Conseil des sciences, 2013; Ministère de l'Éducation, 2006). Il est en effet difficile de ne pas être en contact avec ses nombreuses retombées : médecine, technologies, environnement, etc. Par son rôle d'introduction aux savoirs, l'école devient alors le lieu idéal pour y développer sa culture scientifique et y apprendre la multitude de concepts essentiels à la compréhension des nombreux enjeux de notre société.

Bien que les visées de l'enseignement scientifique aient évolué avec les années (DeBoer, 2000), il est possible d'identifier quatre arguments principaux pour apprendre les sciences : économique, utilitaire, démocratique et culturel (Millar, 2012, p. 24). La science constitue en effet un moteur important de l'innovation et s'avère très utile dans

plusieurs situations quotidiennes. Elle permet aussi de prendre des décisions éclairées sur de nombreux enjeux de société en plus de constituer une richesse culturelle importante. Le Ministère de l'Éducation, du Loisir et du Sport (MELS) reconnaît d'ailleurs ces objectifs dans son *Programme de formation* et souligne que le programme de sciences et technologies doit viser « [...] à développer chez les élèves une culture scientifique et technologique de base accessible à tous » (Ministère de l'Éducation, 2006, p. 268). L'Organisation de coopération et de développement économiques (OCDE) partage cette vision et affirme qu'il « [...] est plus important que jamais de comprendre des théories et des concepts scientifiques fondamentaux et de savoir structurer et résoudre des problèmes scientifiques. » (OCDE, 2007, p. 18). L'organisme mentionne aussi qu'un « [...] contact positif avec les sciences et technologies à un stade précoce peut avoir un impact durable [...] » (OCDE, 2008, p. 15). L'école doit donc s'assurer de bien transmettre les savoirs scientifiques, d'autant plus que les difficultés en science vont directement influencer l'intérêt, la motivation et le choix de carrière dans ce domaine (Masnick, Valenti, Cox et Osman, 2009).

Cependant, l'enseignement des sciences, dont la chimie, est souvent composé d'une collection de sujets épars et de concepts abstraits. De plus, les curriculums entretiennent souvent une centration excessive sur la résolution de problèmes algorithmiques (Talanquer et Pollard, 2010). Cette habitude peut faire obstacle au développement d'une culture scientifique de qualité puisque plusieurs recherches révèlent l'écart parfois important entre la capacité à résoudre un problème algorithmique et la compréhension des concepts (Mulford et Robinson, 2002; Nakhleh et Mitchell, 1993; Salta et Tzougraki, 2011). Cette situation se reflète d'ailleurs dans les résultats en science aux tests internationaux qui dressent un portrait préoccupant du niveau de compréhension des élèves québécois. L'analyse des résultats du Programme international pour le suivi des acquis des élèves (PISA) de l'année 2012 permet de remarquer que « le rendement en sciences a diminué au fil du temps au Canada, quatre provinces [dont le Québec] ayant observé des déclin significatifs des niveaux

d'habiletés des élèves de 15 ans entre 2006 et 2012. » (Brochu, Deussing, Houme et Chuy, 2013, p. 50)¹. Cette baisse de rendement au Québec était déjà observable avec les résultats du Programme pancanadien d'évaluation (PPCE) de 2010 qui a d'ailleurs incité le MELS à demander au Conseil supérieur de l'éducation (CSÉ) d'enquêter sur l'état de l'enseignement des sciences au Québec (Conseil supérieur de l'éducation, 2013). Le CSÉ conclut que cette baisse n'est toutefois pas si préoccupante, mais que les enseignants, notamment au primaire, « [...] sont encore nombreux à se sentir peu compétents au regard du programme de science et technologie » (Conseil supérieur de l'éducation, 2013, p. 77) en plus de recommander « d'affirmer de manière tangible aux acteurs scolaires l'importance [que le Ministère] accorde à l'apprentissage de la science et de la technologie dès le début du primaire. » (Conseil supérieur de l'éducation, 2013, p. 70).

Dans ce contexte, des recherches de qualité en éducation peuvent fournir des recommandations importantes susceptibles d'améliorer les pratiques et la formation des enseignants en leur permettant de se baser sur des données probantes (Hargreaves, 1999; Saussez et Lessard, 2009; Slavin, 2002). Une amélioration des pratiques en éducation pourrait alors contribuer à orienter l'enseignement vers une meilleure compréhension des concepts et ainsi faciliter la construction d'une culture scientifique adéquate.

1.2 Conceptions alternatives des élèves

Plusieurs causes permettent d'expliquer les difficultés à acquérir les concepts scientifiques et la faible compréhension conceptuelle des élèves. Un important champ de recherche a d'ailleurs cherché à les identifier (Johnstone, 1991; Millar, 1991; Sirhan, 2007). Parmi tous les obstacles soulevés par les chercheurs, la présence des conceptions

¹ On note toutefois une légère amélioration dans les résultats du PISA 2015, mais un biais de non-réponse invite à la prudence pour les résultats du Québec (O'Grady, Deussing, Scerbina, Fung et Muhe, 2016).

initiales des élèves qui interfèrent avec l'apprentissage revient fréquemment (Liu, 2001; Wandersee, Mintzes et Novak, 1994). Carey (2000) affirme d'ailleurs que :

la barrière principale à l'apprentissage des contenus curriculaires [...] n'est pas ce que l'élève n'a pas, mais plutôt ce qu'il a déjà, c'est-à-dire, les cadres conceptuels alternatifs [*alternative conceptual frameworks*] permettant de comprendre les phénomènes couverts par la théorie que nous essayons d'enseigner. (p. 13, traduction libre)

Les chercheurs ont donc tenté de mieux comprendre ces conceptions donnant ainsi naissance à un important champ de recherche attirant même une attention parfois jugée disproportionnée (Johnstone, 2000a). La dernière bibliographie de Pfundt et Duit (2009) contient d'ailleurs plus de 8000 références sur ce thème. Plusieurs recensions des écrits ont permis de colliger les conceptions erronées des élèves tant en physique (Albanese, 1997; Brewer, 2008; Tallant, 1993), en biologie (Mintzes et Arnaudin, 1984; Wandersee *et al.*, 1994) qu'en chimie (Garnett, Garnett et Hackling, 1995; Horton, 2007; Zoller, 1990). En plus d'être variées, ces conceptions auxquelles adhèrent les élèves, et parfois même les enseignants (Duit et Treagust, 2012; Wandersee *et al.*, 1994), sont aussi persistantes et vont donc résister à l'enseignement traditionnel (Liu, 2001; Wandersee *et al.*, 1994) au point « [...] qu'une fraction significative de la population les maintient même après 500 heures de laboratoires et 400 heures de cours magistraux [...] » (Bodner, 1991, p. 388, traduction libre).

Cet intérêt a aussi entraîné une multiplication des termes afin de désigner ces conceptions des élèves qui sont en désaccord avec les connaissances scientifiques (Abimbola, 1988). Ainsi, on parle parfois de conceptions erronées (Helm, 1980; Nussbaum, 1979), de conceptions alternatives (Osborne et Gilbert, 1980), de préconceptions (Ausubel, Novak et Hanesian, 1968; Hashweh, 1988), de croyances [ou conceptions] naïves (Caramazza, McCloskey et Green, 1981), de raisonnement spontané (Viennot, 1979), de science des enfants (Gilbert, Osborne et Fensham, 1982), de conceptions inattendues (Potvin, 2011) et autres. L'utilisation de ces diverses

expressions reflète les nombreuses visions épistémologiques des chercheurs concernant l'origine et le rôle des conceptions des élèves ainsi que sur les processus cognitifs sollicités lors de l'apprentissage. Malgré ces différences, elles expriment toutes l'idée que les conceptions des élèves auraient avantage à évoluer vers les conceptions scientifiques. Dans la présente recherche, l'expression *conception alternative* sera privilégiée, car elle reflète l'opposition à la conception scientifique sans toutefois discréditer la valeur intellectuelle du raisonnement de l'élève. Elle retient donc l'aspect parfois utile et efficace des conceptions des élèves. En effet, malgré leur opposition avec le savoir scientifique, les conceptions alternatives possèdent malgré tout une certaine cohérence, peuvent s'avérer exactes dans certains contextes et peuvent parfois servir « d'ancrage » à l'apprentissage de concepts contre-intuitifs (Clement, 1993; Clement, Brown et Zietsman, 1989).

Plusieurs causes peuvent permettre d'expliquer l'origine des conceptions alternatives. Wandersee et ses collaborateurs (1994) mentionnent l'interaction directe avec le monde physique et les expériences personnelles vécues dans ce contexte. En effet, le caractère local et les limites des sens font en sorte que la portée des conceptions développées ou entretenues soit parfois limitée à cette localité et aux informations immédiatement disponibles. Des chercheurs en didactique soulignent aussi l'influence importante des enseignants et des manuels dans le développement des conceptions alternatives lors de l'apprentissage de la chimie (Albanese & Vicentini, 1997; Bodner, 1991; Drechsler et Schmidt, 2005; Levy et al., 2010; Taber, 2001a). Taber (2001a) affirme que cette situation particulière de la chimie provient du fait que les apprenants ne sont pas mis en contact direct avec les phénomènes à conceptualiser. En effet, la chimie est une discipline abstraite et plutôt éloignée du quotidien des élèves (Gabel, 1999) contrairement, par exemple, à la physique mécanique. Les apprentissages formels effectués à l'école, ainsi que le matériel didactique disponible, deviennent alors les principales sources d'ancrage des nouveaux apprentissages et des conceptions alternatives.

Une seconde source potentielle de conceptions alternatives provient du raisonnement des élèves souvent influencé par le sens commun et les heuristiques (Taber, 2001b, 2014; Talanquer, 2006, 2015). Bien que ce type de raisonnement peut s'avérer efficace au quotidien, il peut aussi entraîner l'existence de conceptions alternatives si les élèves ne parviennent pas à identifier les limites des heuristiques qu'ils mobilisent. Le raisonnement des élèves en chimie est aussi influencé par une particularité épistémologique de cette science qui regroupe trois domaines de savoir : le domaine macroscopique (phénomènes observables), sous-microscopique (atomes, molécules, ions, etc.) et symbolique (formules et équations chimiques). Cette particularité de la chimie, nommée « relation du triplet », a été formulée pour la première fois par Johnstone (1982) et a ensuite été bonifiée par quelques auteurs (Talanquer, 2011; Towns, Raker, Becker, Harle et Sutcliffe, 2012). Selon les chercheurs, les novices n'ont pas les capacités des experts à raisonner facilement d'un domaine à l'autre, ce qui pourrait expliquer plusieurs des difficultés spécifiques à la chimie (Gabel, 1999; Taber, 2001a).

Confrontés à ces particularités de la chimie, les enseignants doivent pouvoir identifier les meilleures approches pour éviter que leur enseignement ne soit la source de conceptions alternatives. De plus, ils doivent aussi posséder les outils pour reconnaître les failles dans le raisonnement de leurs élèves et tenter de les guider vers un raisonnement scientifique.

1.3 Changement conceptuel

Les chercheurs ont d'ailleurs tenté de mieux comprendre les processus d'apprentissage qui favorisent le passage d'une conception alternative à une conception scientifique. C'est dans ce contexte que s'est développé le domaine du changement conceptuel « [qui] dénote les parcours d'apprentissage (*learning pathways*) des élèves de leurs conceptions initiales vers les concepts scientifiques à apprendre » (Duit, 1999, cité dans Duit et Treagust, 2003, p. 673, traduction libre). Le changement conceptuel permet

alors de faire la distinction entre un apprentissage plus banal, comme la mémorisation de faits, d'un apprentissage plus complexe qui change la structure conceptuelle des apprenants (diSessa et Sherin, 1998; Tyson, Venville, Harrison et Treagust, 1997).

La majorité des modèles de changement conceptuel s'inspirent des travaux d'Ausubel (1968) et de Piaget (1985) puisqu'ils considèrent l'apprentissage comme un processus constructiviste où les concepts se construisent sur la base des connaissances antérieures. Cette idée était d'ailleurs déjà présente dans les écrits de Bachelard qui affirmait que :

Quand il se présente à la culture scientifique, l'esprit n'est jamais jeune. Il est même très vieux, car il a l'âge de ses préjugés. Accéder à la science, c'est, spirituellement rajeunir, c'est accepter une mutation brusque qui doit contredire un passé. (Bachelard, 1938, p. 17)

Les idées de révolutions scientifiques et d'incommensurabilité développées par Kuhn (1962) et celle d'écologie conceptuelle de Toulmin (1972) constituent aussi un fondement important de certains modèles de changement conceptuel (diSessa, 2008). Le modèle de Posner, Strike, Hewson et Gertzog (1982) représente probablement le modèle le plus influent de changement conceptuel. En combinant les idées de Kuhn et les concepts d'assimilation et d'accommodation, ces chercheurs ont créé le paradigme qui allait guider la recherche de ce domaine (Vosniadou, 2008, p. xiv).

Les modèles se sont ensuite multipliés et divisés selon plusieurs perspectives différentes selon l'angle visé pour décrire le changement conceptuel. L'une des divisions les plus importantes concerne l'organisation des conceptions alternatives (diSessa, 2006; Özdemir et Clark, 2007). Certains considèrent que les conceptions sont très organisées (*connaissances-en-théories*) permettant ainsi des prédictions similaires dans toutes les situations (Carey, 1999; Chi, 2005; Ionides et Vosniadou, 2002; Wellman et Gelman, 1992 cités dans Özdemir et Clark, 2007) . D'autres croient plutôt que les conceptions sont constituées d'éléments quasi indépendants (*connaissances-*

en-éléments) dont l'utilisation est hautement sensible au contexte (Clark, 2006; diSessa, Gillespie et Esterly, 2004; Harrison, Grayson et Treagust, 1999; Linn, Eylon et Davis, 2004 cités dans Özdemir et Clark, 2007). Selon diSessa (2006), l'approche *connaissances-en-théories* serait prédominante au sein des recherches.

Cependant, il n'existe aucun consensus sur la meilleure approche à adopter :

Il n'y a, en fait, aucune théorie sur le changement conceptuel qui soit largement acceptée, bien articulée et testée. Il s'agit plutôt d'un champ où une multitude de perspectives combinent plusieurs idées théoriques et de sens communs lui conférant une allure kaléidoscopique (diSessa, 2006, p. 266, traduction libre).

Rusanen (2014) dresse d'ailleurs le même portrait des recherches sur le changement conceptuel et souligne que « [...] malgré la fertilité du champ, il y a encore des enjeux théoriques essentiels [...] pour lesquels aucun consensus n'a émergé. » (p. 1413, traduction libre).

L'un des éléments d'insatisfaction qui découle de ce manque de consensus concerne la notion même de *changement*. En effet,

l'idée que les conceptions initiales ne sont plus intactes après un changement conceptuel est implicitement incluse dans l'expression. Elles doivent, selon le concept de changement, être complètement abandonnées [...], modifiées [...], remplacées [...], réorganisées [...], éliminées [...], rejetées [...], transformées ou « restructurées » [...]. (Potvin, 2013, p. 20, traduction libre)

Dans ce contexte de « changement » ou de « reconfiguration », on vise généralement un conflit cognitif afin que l'élève prenne conscience des limites de sa conception et souhaite la modifier pour la conception scientifique (Limón, 2001). Il est alors normal que les auteurs s'intéressent très peu à l'avenir des conceptions alternatives une fois la bonne réponse obtenue puisque l'on conclut généralement qu'un changement conceptuel a eu lieu. Néanmoins, des chercheurs se sont opposés à cette vision dominante et ont plutôt proposé une vision où les conceptions coexisteraient (Bélanger,

2008; Larochelle et Désautels, 1992; Linder, 1993; Mortimer, 1995; Ohlsson, 2009; Potvin, 2013, 2017; Solomon, 1983). Selon cette approche, il est possible, et même normal, que deux ou plusieurs conceptions coexistent. Les conceptions alternatives agissent alors comme des obstacles qui nuisent ou bloquent le recours à la conception scientifique.

Concrètement, cette distinction sur l'avenir des conceptions influence de manière importante le travail des enseignants. En effet, l'enseignant ne doit plus simplement enseigner la nouvelle conception. Il doit aussi guider ses élèves et les aider à surmonter leurs conceptions alternatives et reconnaître les contextes où leur utilisation est erronée. Il s'ensuit une organisation différente de l'enseignement. L'enseignant qui vise un conflit cognitif afin de permettre le changement des conceptions n'emploiera pas les mêmes stratégies et ne sera pas attentif aux mêmes informations qu'un enseignant qui considère que les conceptions coexistent. Cette divergence rend plus ardue l'application des théories du changement conceptuel et pourrait expliquer, du moins en partie, pourquoi les enseignants ne s'approprient pas les stratégies d'enseignement et d'apprentissage visant à faciliter le changement conceptuel (Duit et Treagust, 2012). Il est donc important de comprendre ce qu'il advient des conceptions à la fin de l'enseignement pour orienter les pratiques selon les objectifs qui favorisent davantage les apprentissages.

La résolution de ce dilemme s'avère toutefois problématique, spécialement pour les tenants de la coexistence étant donné qu'il est difficile d'identifier clairement ce qu'il advient des conceptions. En effet, les élèves ne sont pas toujours conscients de leurs conceptions et une mauvaise réponse à une question n'indique pas toujours la présence d'une conception alternative stable puisque les élèves peuvent élaborer une conception temporaire selon le contexte de la question (diSessa, 2002; Potvin et Thouin, 2003). Il est donc difficile de déterminer ce qui perdure dans le cerveau des élèves après un changement conceptuel. Bien que quelques études, majoritairement longitudinales,

aient permis de souligner la présence de plusieurs représentations d'un même contexte (Taber, 2000), elles demandent énormément de temps et ne permettent pas toujours d'étudier plusieurs élèves à la fois. Les approches conventionnelles possèdent certaines limites et il semble donc de plus en plus pertinent d'employer des protocoles et des outils de mesure différents afin de varier les façons d'aborder le changement conceptuel. Cette étude utilisera d'ailleurs l'approche de la neuroéducation pour tenter d'y parvenir.

1.4 Apport de la neuroéducation dans le changement conceptuel

La contribution principale du croisement entre les neurosciences et l'étude du changement conceptuel est la reconnaissance du rôle important de l'inhibition. Les neuroscientifiques décrivent l'inhibition comme étant un acte de contrôle exécutif des fonctions cognitives qui contribue à contrôler le comportement et à l'orienter vers un but. Ainsi, cela « [...] permet à notre cerveau de résister aux distracteurs, aux interférences » (Houdé, 2008, p. 56) grâce à « [...] une réduction/suppression de l'activité d'une région cérébrale (ou d'un processus cognitif) activée par l'activité d'une autre région ou d'un autre processus » (Ward, 2015, p. 70). Ce rôle de contrôle et de régulation lui confère d'ailleurs une responsabilité essentielle dans l'évolution et l'adaptation de l'être humain (Bjorklund et Harnishfeger, 1995; Houdé, 2000). Certaines études récentes semblent d'ailleurs indiquer que ce processus cognitif serait responsable de la capacité des experts à recourir à des conceptions scientifiquement valides en leur permettant de bloquer leurs conceptions alternatives.

Pour parvenir à cette conclusion, les chercheurs ont dû faire preuve d'originalité afin de faire ressortir la coexistence des conceptions. En effet, l'utilisation de questionnaires traditionnels n'est pas toujours efficace puisqu'il est souvent possible de répondre correctement à une question malgré la présence de conception alternative (Potvin, 2013). Certains chercheurs ont donc cherché à provoquer le recours aux conceptions alternatives. Ainsi, en réduisant le délai alloué pour répondre aux questions, Kelemen

et Rosset (2009) ont remarqué que les adultes retournaient à des explications téléologiques (croyance naïve selon laquelle les choses existent pour un but précis). Ce type d'explication est fréquent chez les enfants et entraîne plusieurs conceptions alternatives telles que la croyance qu'un animal est bien adapté à son milieu *dans l'objectif* d'améliorer sa survie. Dans une étude subséquente auprès de professeurs d'université de divers domaines scientifiques, Kelemen, Rottman et Seston (2012) ont remarqué le même retour à des explications naïves lorsque le délai pour répondre était limité. Ce phénomène est aussi observable auprès de patients atteints d'Alzheimer qui retournent aussi à des explications téléologiques ou animistes (Lombrozo, Kelemen et Zaitchik, 2007; Zaitchik et Solomon, 2008). Ces études semblent donc indiquer que les conceptions alternatives demeurent présentes dans le cerveau et qu'elles peuvent se manifester lorsque le contrôle cognitif est atténué.

Afin de déterminer si la résistance des conceptions alternatives est présente dans plusieurs domaines scientifiques, Shtulman et Valcarcel (2012) ont élaboré des questions de type vrai ou faux dans 10 domaines scientifiques différents. Dans tous les cas, les questions incongruentes (c'est-à-dire dont les réponses scientifiquement valables s'opposent aux conceptions alternatives) ont été moins bien réussies en plus d'avoir nécessité un temps de réponse plus élevé. Ce ralentissement dans les réponses des participants peut ainsi être attribué à un traitement plus complexe de l'information, notamment dû à la nécessité d'inhiber la conception alternative. Le même résultat a aussi été obtenu dans une étude subséquente, et ce, peu importe l'âge ou l'expertise scientifique des participants (Shtulman et Harrington, 2015). Des protocoles semblables basés sur la chronométrie mentale (l'étude des temps de réponse) ont aussi permis de souligner la coexistence des conceptions dans l'apprentissage du concept de vivant (Babai, Sekal et Stavy, 2010; Goldberg et Thompson-Schill, 2009) et du concept de flottabilité (Potvin et Cyr, 2017; Potvin, Masson, Lafortune et Cyr, 2014; Potvin, Sauriol et Riopel, 2015). Ces études seront d'ailleurs discutées plus en détail dans le chapitre suivant.

Contrairement aux études précédentes, Dunbar, Fugelsang et Stein (2007) ont plutôt utilisé l'imagerie cérébrale pour étudier une conception fréquente en physique et ainsi mieux comprendre les processus cognitifs contribuant à la compréhension de cette discipline. Cette étude, qui n'a malheureusement pas été publiée dans une revue scientifique et dont plusieurs informations méthodologiques demeurent inconnues, amène malgré tout les auteurs à avancer l'hypothèse de la coexistence des conceptions et de l'inhibition. Inspirés par ces conclusions, Masson, Potvin, Riopel et Brault-Foisy (2014) ont voulu étudier l'activité cérébrale lors de l'évaluation de stimuli à propos de la conception alternative qu'un seul fil est requis pour allumer une ampoule. Lors de l'évaluation de stimuli qui s'opposent aux conceptions alternatives, ils ont observé, chez les experts, une activation plus importante des zones reliées à l'inhibition (voir Section 2.2.2). Ces résultats ont aussi été obtenus en mécanique lors de l'évaluation de films semblables à ceux de Dunbar *et al.* (2007) et qui représentent la chute de balles (Brault Foisy, Potvin, Riopel et Masson, 2015). Combinées ensemble, ces deux études renforcent l'hypothèse que l'inhibition serait un élément important de l'expertise en physique.

Toutefois, l'hypothèse de coexistence des conceptions en chimie demeure beaucoup moins étudiée qu'en physique. À l'aide d'une méthodologie plus traditionnelle, Kwon et Lawson ont attribué un rôle significatif à l'inhibition dans le gain conceptuel suite à plusieurs leçons sur la pression des gaz. Parmi plusieurs facteurs, tels que la mémoire de travail et la planification, l'inhibition arrivait en tête en expliquant près de 30 % de la variance.

D'autres auteurs ayant étudié l'apprentissage de la chimie se sont plutôt attardés à l'influence des heuristiques (Graulich, 2015; Graulich, Hopf et Schreiner, 2010; Maeyer et Talanquer, 2010, 2013; McClary, 2010; McClary et Talanquer, 2011; Taber, 2009; Talanquer, 2006, 2009), des connaissances implicites (Taber, 2014; Taber et García-Franco, 2010; Talanquer, 2015) ou de la dualité des modèles (Flores-Camacho,

Gallegos-Cázares, Garritz et García-Franco, 2006; Harrison et Treagust, 2000; Taber, 2000, 2001). Bien que ces auteurs ne mentionnent pas explicitement le rôle de l'inhibition dans la capacité à bloquer les heuristiques ou l'utilisation inadéquate d'un modèle, ils prônent tous la recherche de stratégies qui vont permettre de mieux outiller les enseignants. Talanquer (2014) souligne d'ailleurs l'immense travail que cela représente : « [...] des stratégies effectives pour aider les élèves à contrôler les heuristiques demandent des changements ambitieux et coordonnés dans l'enseignement de la chimie; des interventions isolées sont susceptibles d'avoir une incidence très faible » (p. 1095, traduction libre).

À notre connaissance, seulement deux études ont utilisé les temps de réponse ou l'imagerie cérébrale pour analyser le changement conceptuel en chimie. La première a employé la chronométrie mentale pour démontrer la persistance de conceptions alternatives dans la classification des substances. Les enfants ont effectivement souvent tendance à associer la capacité à se verser aux liquides (Stavy et Stachel, 1985) ou la rigidité aux solides (Krněl, Glažar et Watson, 2003; Stavy et Stachel, 1985). Lors de la classification de différentes substances, les stimuli incongruents (les liquides denses et les poudres) ont pris plus de temps que les stimuli congruents à être évalués correctement. Les auteurs ne font toutefois pas référence aux processus inhibiteurs pour expliquer le délai dans les temps de réponse. L'auteur principal avance cependant cette hypothèse pour expliquer les résultats d'une étude similaire sur le concept de vivant/non-vivant (Babai, Sekal *et al.*, 2010).

La seule étude ayant utilisé l'imagerie cérébrale afin d'observer l'activité cérébrale des novices et des experts en chimie a été effectuée par Nelson, Lizcano, Atkins et Dunbar (2007). L'interprétation de leurs résultats, présentés uniquement lors d'une présentation par affiche en congrès, semble contredire les conclusions obtenues en physique. En effet, lors de l'évaluation de stimuli concernant l'évaporation, ils ont observé que les experts activaient davantage les zones frontales reliées à la mémoire

de travail et la récupération d'informations. Cette divergence avec les résultats obtenus en physique amène les auteurs à conclure à l'absence de « signature neuronale » pour le changement conceptuel en sciences.

Toutefois, ces conclusions méritent d'être nuancées. Plusieurs informations importantes de leur étude demeurent inconnues puisque celle-ci n'a pas fait l'objet d'une publication révisée par les pairs. De plus, Masson, Potvin, Riopel, Brault-Foisy et Lafortune (2012) invitent eux aussi à la prudence et affirment qu'il est encore trop tôt pour rejeter l'hypothèse d'un rôle de l'inhibition en chimie, puisqu'une seconde hypothèse, compatible avec l'inhibition, est possible. Cette proposition sera d'ailleurs discutée à la section 2.2.3.3.

Il semble donc nécessaire de poursuivre l'étude des conceptions alternatives en chimie afin de pouvoir évaluer l'importance du rôle de l'inhibition dans l'apprentissage de cette discipline.

1.5 Question de recherche

La présence de conceptions alternatives qui interfèrent avec l'apprentissage de nouveaux concepts constitue un problème majeur dans l'enseignement des sciences, notamment en chimie. De même, l'absence de consensus sur les modèles de changement conceptuel (diSessa, 2006, 2008; Rusanen, 2014) ainsi que sur l'avenir des conceptions (Potvin, 2013) témoigne de la complexité de ce phénomène en plus d'accentuer l'intérêt d'étudier ce phénomène sous un angle nouveau, ce que propose la neuroéducation en utilisant l'imagerie cérébrale. Cet outil demeure d'ailleurs l'un des meilleurs moyens de mesurer l'activité cérébrale et de mettre en lumière les processus cognitifs nécessaires à la réalisation d'une tâche. Cette nouvelle variable a en outre permis d'observer le rôle potentiellement important de l'inhibition dans l'expertise en électricité (Masson *et al.*, 2014) et en mécanique (Brault Foisy, 2013; Dunbar *et al.*, 2007). Cette conclusion contraste avec l'approche dominante du changement conceptuel, car elle sous-entend la coexistence des conceptions alternatives et

scientifiques. Contrairement aux novices, les experts parvenaient à mieux inhiber les réseaux neuronaux associés aux conceptions alternatives permettant ainsi le recours à la conception scientifique. Cependant, une seule étude préliminaire a étudié l'activité cérébrale en chimie (Nelson *et al.*, 2007) et leurs résultats ne penchent pas vers l'inhibition. Une meilleure compréhension des processus cognitifs utiles au changement conceptuel en chimie est donc requise afin de déterminer s'il est judicieux d'y appliquer les recommandations basées sur l'inhibition. En effet, il est probable que l'inhibition ne soit pas requise ou qu'un autre processus cognitif, comme la visualisation spatiale (Wu et Shah, 2004), soit nécessaire. La présente recherche souhaite donc utiliser l'imagerie cérébrale afin de répondre à la question : *est-ce que les experts en chimie possèdent des conceptions alternatives qu'ils doivent inhiber au moment de produire des réponses scientifiques?*

Les retombées possibles de cette étude sont multiples. Tout d'abord, les résultats permettront de mieux comprendre le rôle de l'inhibition dans l'apprentissage de la chimie. Il sera alors possible de délimiter son importance et de déterminer la nécessité de l'étudier davantage dans les salles de classe. En effet, le recours à l'imagerie cérébrale se fait dans un contexte très contrôlé et considérablement éloigné de celui que l'on retrouve dans les écoles. Il serait alors pertinent de voir comment il est possible de transposer les résultats de cette étude dans un contexte scolaire. Par exemple, il pourrait être pertinent de poursuivre l'analyse des heuristiques couramment utilisées par les élèves et de cerner comment les inhiber (Graulich *et al.*, 2010; Maeyer et Talanquer, 2010, 2013; McClary et Talanquer, 2011; Taber, 2014; Talanquer, 2006, 2014, 2015). Un rôle important de l'inhibition en chimie viendrait aussi appuyer l'hypothèse de la coexistence des conceptions. Il serait alors pertinent d'étudier les modèles basés sur la coexistence afin de déterminer ceux qui s'appliqueraient le mieux à l'enseignement de la chimie.

De même, la reconnaissance de la coexistence des conceptions suppose une organisation différente de l'enseignement. L'enseignant ne cherche plus à modifier ou effacer les conceptions alternatives, mais tentera plutôt de développer la capacité d'inhibition de ses élèves afin qu'ils puissent bloquer l'utilisation de leurs conceptions alternatives lorsque le contexte est inapproprié. Il devra alors modifier la planification de son enseignement afin d'employer les stratégies adaptées à ce nouvel objectif. Par exemple, il pourrait être pertinent d'employer les stratégies proposées par Houdé *et al.* (2000; 2001), Potvin (2013; 2017) et Babai et son équipe (Babai *et al.*, 2015; Babai *et al.*, 2014; Stavy et Babai, 2010). Ces auteurs ont, entre autres, recommandé l'utilisation d'alertes émotives pour souligner la présence de *pièges intuitifs* en plus d'entraîner les élèves à reconnaître les réponses erronées afin de favoriser l'utilisation des conceptions scientifiques. Toutefois, ce changement dans les méthodes d'enseignement ne se fait pas sans difficulté et il existe un écart important entre la pratique des enseignants et les résultats de recherche (Duit et Treagust, 2012). Une preuve supplémentaire de la coexistence des conceptions augmenterait la crédibilité des théories de changement conceptuel basées sur la coexistence et pourrait ainsi faciliter leur intégration dans les pratiques des enseignants.

Une confirmation de la coexistence des conceptions inciterait aussi à revoir l'organisation du curriculum et de la progression des apprentissages dans les cours de chimie. Plusieurs chercheurs s'opposent déjà à l'organisation logique des concepts et optent plutôt pour une organisation orientée sur l'application concrète (Reid, 2000) ou sur la psychologie des apprenants (Johnstone, 2000b). Une réorganisation serait peut-être nécessaire afin de considérer que les conceptions alternatives des élèves ne s'effacent pas et que les concepts scientifiques doivent être enseignés et utilisés fréquemment pour favoriser les apprentissages. De plus, une meilleure planification de l'enseignement et des curriculums pourrait, à long terme, contribuer à l'amélioration de la culture scientifique de la population en améliorant la prévalence des apprentissages scolaires.

CHAPITRE II

CADRE THÉORIQUE

Lors du chapitre précédent, l'apprentissage parfois ardu des concepts scientifiques lorsque ceux-ci interfèrent avec les conceptions alternatives a été soulevé. De plus, le changement conceptuel, champ de recherche consacré à résoudre cette difficulté, a aussi été brièvement présenté. Cependant, une multitude de modèles ont découlé de ces recherches sans qu'aucun parvienne à se démarquer. La neuroéducation, qui allie les neurosciences et les sciences de l'éducation, contribue au débat en proposant l'hypothèse du rôle important de l'inhibition afin de surmonter les conceptions alternatives qui coexisteraient avec les concepts scientifiques appris à l'école. La fonction de ce processus cognitif dans le changement conceptuel en chimie demeure toutefois à étudier.

Ce chapitre présentera les concepts importants de cette recherche. Tout d'abord, le concept de changement conceptuel sera abordé. Un rappel des propriétés des conceptions alternatives introduira la présentation des fondements du changement conceptuel. Ensuite, quelques modèles seront détaillés, analysés et classés selon une classification basée sur l'avenir des conceptions après le changement conceptuel. Dans un deuxième temps, le concept d'inhibition sera présenté. La description de ce concept sera suivie de l'identification des différentes régions cérébrales liées à ce processus. Son rôle dans l'apprentissage, notamment en sciences, sera ensuite présenté. Le chapitre se conclut par la présentation de l'hypothèse de recherche.

2.1 Conceptions alternatives et changement conceptuel

Cette section du cadre théorique est consacrée à l'analyse des conceptions alternatives et du changement conceptuel. En premier lieu, la différence entre une conception et un concept sera explicitée afin de mieux comprendre le processus de changement conceptuel. Ensuite, différentes tentatives de modélisation du changement conceptuel seront discutées et présentées selon leur vision de l'avenir des conceptions.

2.1.1 Des conceptions alternatives aux concepts scientifiques

Depuis plusieurs années, les conceptions alternatives des élèves occupent une place importante dans les recherches en éducation. Cet intérêt a permis de souligner la grande variété des conceptions alternatives dans l'ensemble des disciplines scientifiques. En plus d'être variées, ces conceptions alternatives s'avèrent aussi persistantes et résistantes au changement en plus d'interférer avec l'enseignement (Wandersee *et al.*, 1994). L'influence des conceptions alternatives est telle qu'Ausubel écrit qu'il pourrait résumer l'ensemble de la psychologie éducative en un seul principe : « Trouve ce que l'apprenant connaît déjà et adapte ton enseignement en conséquence » (1968, p. 377, traduction libre).

L'étude des conceptions alternatives des élèves s'est d'ailleurs développée en opposition à l'idée de *tabula rasa* qui stipule que l'élève arrive en classe la tête vide. Dès 1938, Bachelard mentionne que « [l']on connaît contre une connaissance antérieure, en détruisant des connaissances mal faites, en surmontant ce qui, dans l'esprit même, fait obstacle [...] » (p.17). Ces obstacles épistémologiques décrivent les « causes d'inertie », inhérentes à la connaissance, qui ralentissent l'apprentissage et le transforment en une suite de rectifications successives permettant de se rapprocher du savoir scientifique. Cependant, ces conceptions antérieures ne constituent pas uniquement une source d'obstacles puisqu'elles agissent aussi comme un cadre de référence sur lequel les nouvelles connaissances peuvent s'inscrire (Clement, 1993; Clement *et al.*, 1989; Smith, diSessa et Roschelle, 1994). Giordan et de Vecchi (1987)

mentionnent d'ailleurs que l'apprentissage doit se faire « avec » et « contre » les conceptions alternatives. Une bonne compréhension des conceptions alternatives des élèves par l'enseignant est donc nécessaire afin de déterminer les points d'ancrage ou de rupture pour faciliter l'évolution des conceptions alternatives vers les concepts scientifiques.

Il convient toutefois de préciser les définitions de « conceptions » et de « concepts » afin de bien comprendre le processus de changement conceptuel. En effet, Jean Migne (1970), l'un des premiers francophones à introduire la notion de représentations en éducation (employée ici comme un synonyme de conception), établit une distinction entre « conception » et « concept » qu'il considère comme deux modes de connaissance distincts. Selon lui, le concept « [...] est un nœud de relations définies en termes opératoires [alors que la conception] est un mode de connaissance à prédominance figurative ».

Selon le dictionnaire de l'éducation de Rénald Legendre, une conception se définit comme une « représentation interne d'idées coordonnées et d'images explicatives utilisées par l'apprenant pour sélectionner, organiser, structurer de nouvelles informations, et ainsi s'appropriier le réel » (Schmidt, 1989, cité dans Legendre, 2005, p. 268).

Reuter et ses collaborateurs associent plutôt les conceptions à « des systèmes de connaissances qu'un sujet mobilise face à une question ou à une thématique, que celle-ci ait fait l'objet d'un enseignement ou pas » (Reuter, Cohen-Azria, Daunay, Delcambre et Lahanier-Reuter, 2013, p. 191). Ces derniers, tout comme Potvin (2007), rappellent d'ailleurs la grande variabilité des conceptions selon le contexte et l'importance de considérer que la conception « ne peut prétendre rendre compte d'un état de connaissance unique du sujet, mais simplement de celui qu'il a convoqué dans ce contexte précis et à un moment donné » (Reuter *et al.*, p. 192).

Marie-Françoise Legendre (2007) décrit plutôt les conceptions comme un « modèle personnel d'organisation des connaissances par rapport à un objet, une situation, un phénomène ou un problème particulier » (p. 294). Elle souligne ainsi l'aspect personnel des conceptions qui s'ancrent autant dans les dimensions sociales et affectives de l'apprenant que dans son quotidien. Les conceptions résultent ainsi des activités cognitives grâce auxquelles l'information est traitée et ne représentent donc pas un simple reflet de la réalité, mais sont plutôt le produit d'une élaboration active. Cette définition rappelle celle de Giordan et de Vecchi (1987) qui avancent que les conceptions ne sont pas le produit, mais le processus d'une activité de construction mentale du réel. De plus, ils mentionnent aussi que les conceptions possèdent une structure et une logique qui leur sont propres leur permettant de se différencier d'un ramassis aléatoire d'éléments.

De leur côté, les concepts se définissent, de façon générale, comme un ensemble d'éléments qui possèdent les mêmes attributs (Astolfi, Darot, Ginsburger-Vogel et Toussaint, 2008). Cependant, cette définition n'est pas assez précise pour décrire un concept scientifique puisque celui-ci est avant tout « [...] un outil intellectuel, qui se veut objectivité et qui établit entre des phénomènes une relation suffisamment générale et invariante, pour autoriser la prévision de résultats ou d'effets » (Astolfi *et al.*, 2008, p. 24). Les concepts sont donc beaucoup plus qu'une accumulation d'informations puisqu'ils résultent de la transformation des conceptions et procurent un nouveau pouvoir explicatif permettant de résoudre une famille de situations-problèmes (Astolfi, 2010).

Pour Legendre (2005), un concept est une « représentation mentale et générale des traits stables et communs à une classe d'objets directement observables, et qui est généralisable à tous les objets présentant les mêmes caractéristiques. » (p. 266). De leur côté, Reuter *et al.* (2013) définissent le concept comme étant une « construction rendant compte de caractéristiques communes à un ensemble d'objets, de faits ou de

phénomènes » (p. 33) en plus de souligner que ceux-ci varient « [...] selon la sphère de pratique au sein de laquelle ils sont élaborés et utilisés. » (p. 33). Conséquemment, il faut distinguer les concepts scientifiques élaborés dans les disciplines scientifiques, les concepts « scolaires » construits dans l'espace scolaire et les concepts « quotidiens » de la vie de tous les jours. De même, un concept n'est jamais isolé et s'enracine dans un réseau complexe parfois désigné par les termes d'écologie conceptuelle (diSessa, 2002; Strike et Posner, 1992; Toulmin, 1972) ou de champ conceptuel (Astolfi et Develay, 2002). Ce réseau relie chaque concept à plusieurs autres concepts et entités mentales à l'instar d'une toile d'araignée. L'ensemble de ces liens vont d'ailleurs influencer les explications du processus de changement conceptuel selon l'angle adopté par le chercheur.

Rusanen et Pöyhönen (2013), quant à eux, conçoivent les concepts scientifiques comme étant des schémas objectifs et partagés par plusieurs individus qui servent d'outils épistémiques aux scientifiques lors de leur travail de production de connaissances. Ils résultent de la collaboration de plusieurs scientifiques et sont donc soumis aux particularités et aux contraintes de l'activité scientifique. Il convient alors de faire la distinction entre les représentations mentales de chaque individu et les concepts scientifiques.

Malheureusement, les recherches sur le changement conceptuel n'apportent pas de plus grande précision quant à la définition d'un concept. En effet, diSessa et Sherin (1998) ont souligné que la majorité des recherches sur le changement conceptuel n'incluent pas de définition précise de la notion de concept. Selon eux, le paradigme classique du changement conceptuel a l'habitude d'associer un mot à un concept même s'il est impossible de présumer que celui-ci résume l'ensemble de la pensée. De plus, cette facilité à attribuer le statut de concept à un mot camoufle leurs différences. En effet, apprendre le concept de « chien », de « force » ou de « nombre » ne s'effectue pas de la même manière. Cette imprécision théorique crée un champ de recherche où chaque

chercheur postule l'existence d'entités cognitives différentes afin d'expliquer le changement conceptuel.

Malgré les multitudes de points de vue, les conceptions alternatives peuvent être perçues comme un système personnel, cohérent et parfois inexact d'explications en vue de représenter un concept qui correspond à un savoir objectif socialement accepté par une communauté scientifique. Le rôle de l'enseignant est donc de faire ressortir les conceptions des élèves, de les analyser et de les faire évoluer pour qu'elles puissent concorder avec le savoir enseigné. Malgré leur possible contradiction avec les connaissances partagées par les scientifiques, les conceptions alternatives s'avèrent cependant efficaces dans plusieurs contextes. Cette efficacité ne doit donc pas être négligée, car elle explique, en partie, la résistance des conceptions. En effet, le recours aux conceptions ou aux heuristiques permet de ne pas avoir à douter de chacune de nos décisions (Potvin, 2011). Elles possèdent donc une grande utilité pour l'apprenant puisqu'elles le poussent à agir. Il ne faut donc pas considérer ces conceptions alternatives comme une simple erreur, mais plutôt, comme un reflet de la pensée de l'élève à un moment précis (Astolfi, 1997). Ainsi, dès les années 1980, le champ de recherche du changement conceptuel a tenté de mieux comprendre les conceptions alternatives des élèves ainsi que leurs mécanismes d'élaboration. Cette meilleure compréhension a découlé sur la modélisation des stratégies les plus favorables pour permettre l'apprentissage d'un concept scientifique.

2.1.2 Changement conceptuel

Afin d'expliquer les « parcours d'apprentissage » qu'empruntent les élèves pour faire évoluer leurs conceptions initiales vers les concepts scientifiques, les chercheurs en éducation se sont grandement inspirés de psychologues comme Piaget et Festinger ainsi que de philosophes des sciences tels que Khun, Toulmin et Lakatos. L'apport de certains de ces chercheurs est d'ailleurs bien décrit par diSessa (2006) dans son historique détaillé des fondements et de l'évolution des recherches sur le changement

conceptuel. Plusieurs visions et définitions du changement conceptuel ont donc été formulées et raffinées selon les différents fondements des chercheurs.

Malgré leurs différences, les chercheurs s'entendent pour associer le changement conceptuel à une révision des structures cognitives de l'apprenant, ce qui exclut la simple addition d'informations découlant notamment de la mémorisation de faits. Ensuite, selon leurs fondements théoriques et leur description des structures cognitives, les modèles vont généralement se diviser selon la force (faible ou forte) de la révision des structures cognitives (Tyson *et al.*, 1997). Ainsi, selon certains modèles (ex : Carey, 1985; Posner, 1982; Vosniadou, 1994) le changement conceptuel décrit surtout les révisions importantes qui modifient grandement les structures cognitives des apprenants. Par exemple, pour Vosniadou, une révision de la théorie-cadre constitue un changement conceptuel beaucoup plus ardu et complet que la révision de la théorie spécifique. À l'opposé, d'autres chercheurs (ex : Hewson, 1981; Thagard, 1992; Dagher, 1994) incluent aussi les révisions mineures dans leur description du changement conceptuel ou décrivent un continuum qui englobe plusieurs types de révisions des connaissances. Cette dernière vision est toutefois moins répandue étant donné l'influence importante de l'approche classique du changement conceptuel inspirée par le modèle de Posner et ses collaborateurs (1982).

Selon cette approche, « l'élève est comme un scientifique, l'apprentissage (des sciences) est un processus rationnel de remplacement de théorie [et] le changement conceptuel est perçu comme un changement de gestalt (*gestalt shift*) qui se produit pendant une courte période de temps » (Vosniadou, 2008, p. xiv, traduction libre). Bien que son influence demeure bien présente dans plusieurs travaux sur le changement conceptuel, plusieurs chercheurs ont rejeté les détails de cette définition (Rusanen et Pöyhönen, 2013; Vosniadou, Baltas et Vamvakoussi, 2007).

En effet, plusieurs critiques ont été soulevées par les différents détracteurs de cette vision du changement conceptuel. Tout d'abord, il a été reproché à cette vision d'être

purement rationnelle et de se concentrer uniquement sur les processus cognitifs et individuels et de négliger les aspects sociaux et culturels (Caravita et Halldén, 1994). D'autres voix se sont aussi levées contre les méthodes d'enseignement qui découlent de cette vision, notamment le recours au conflit cognitif (Limón, 2001). De plus, l'absence de considération pour la motivation et l'intention des élèves (Pintrich, Marx et Boyle, 1993; Sinatra et Pintrich, 2003) ainsi que pour leurs croyances épistémologiques (Hofer et Pintrich, 1997) a aussi été critiquée.

Finalement, la nature du changement conceptuel et comment il se produit a aussi été remis en question. Pour la majorité des chercheurs depuis les années 90, le changement conceptuel n'est pas un processus rapide et radical de remplacement des conceptions, mais il est plutôt décrit comme « un processus graduel durant lequel les structures de connaissances existantes sont continuellement enrichies et/ou restructurées » (Vosniadou et Ioannides, 1998, p. 1221, traduction libre). De même, certains chercheurs vont jusqu'à proposer qu'il ne soit pas nécessaire de remplacer une conception. Pour ces derniers, le changement conceptuel viserait davantage à développer l'habileté des élèves à délimiter les contextes d'utilisation de différents points de vue d'un même concept (Mortimer et El-Hani, 2014; Pozo, Gómez et Sanz, 1999).

L'ensemble de ces réactions à la vision classique du changement a donc entraîné la formulation de plusieurs perspectives variées pour modéliser ce type d'apprentissage. Mortimer résume d'ailleurs cette situation en affirmant que « comme “le constructivisme”, “le changement conceptuel” est devenu une étiquette couvrant un grand nombre de visions différentes et parfois contradictoires » (Mortimer, 1995, p. 267, traduction libre). Cette multiplication des visions complique d'ailleurs l'analyse des modèles de changement conceptuel puisqu'elle entraîne une prolifération des terminologies employées dans les recherches (Rusanen, 2014). Par conséquent, plusieurs taxonomies ont aussi été proposées afin de classer les différents modèles.

Ainsi, on classe parfois les modèles selon le degré d'organisation des conceptions alternatives (Özdemir et Clark, 2007) ou selon les mécanismes de changement conceptuel (Chinn et Samarapungavan, 2009; Rusanen, 2014). Toutefois, puisque cette étude s'intéresse à ce qu'il advient des conceptions alternatives après un changement conceptuel, il a été choisi de présenter le changement conceptuel selon la division présentée dans Potvin (2017) : modèles de *remplacement* des conceptions, modèles de *reconstruction* des conceptions ou modèles de *coexistence* des conceptions.

2.1.3 Modèles de changement conceptuel

Cette section présente les principaux modèles selon leur appartenance à l'une ou l'autre des catégories présentées dans Potvin (2017). Les modèles décrits ici ont été choisis à cause de leur influence dans les recherches sur le changement conceptuel ou parce qu'ils représentent un exemple typique et pertinent de la catégorie et ne prétendent donc pas couvrir tous les modèles présents dans la littérature.

2.1.3.1 Modèles de remplacement des conceptions alternatives

Les modèles de changement conceptuel qui postulent que les conceptions alternatives sont complètement remplacées appartiennent à l'approche « classique » du changement conceptuel (Duit et Treagust, 2012). Selon cette approche brièvement abordée plus haut, les conceptions alternatives des élèves doivent être « attaquées » afin d'en diminuer la crédibilité et de permettre l'altération de ces connaissances inadéquates. Pour y parvenir, la majorité des chercheurs proposent explicitement ou implicitement de créer un conflit cognitif en démontrant que les conceptions alternatives ne parviennent pas à résoudre efficacement tous les problèmes ou en illustrant les contradictions existant entre les différentes croyances (Potvin, 2017). Cette stratégie est censée permettre d'augmenter la crédibilité du concept enseigné et de faciliter la substitution de la conception erronée. On retrouve cette description du changement conceptuel dans plusieurs modèles dont celui de Nussbaum et Novick (1982), de Carey (1985) et de Pintrich, Marx et Boyle (1993). Le modèle de Posner,

Strike, Hewson et Gertzog (Posner *et al.*, 1982; Strike et Posner, 1992) demeure toutefois le représentant le plus influent de cette approche.

Selon Posner et ses collaborateurs, il est possible de dresser une analogie entre le travail d'un élève et celui d'un scientifique. Pour décrire l'apprentissage, ils empruntent les termes d'assimilation et d'accommodation de Piaget sans toutefois s'engager dans sa théorie. Pour eux, l'assimilation constitue l'utilisation de ses connaissances pour affronter de nouveaux phénomènes sans modifications majeures des conceptions. Elle correspond en somme à l'étape de science normale décrite par Kuhn. Cependant, il arrive que les connaissances des élèves ne parviennent pas à traiter les nouvelles informations. Les conceptions des élèves doivent alors être remplacées ou réorganisées, entraînant ainsi le changement conceptuel que les auteurs désignent par le terme d'accommodation.

Les chercheurs proposent alors quatre critères à respecter afin de permettre l'accommodation. Le premier critère stipule que l'élève doit être insatisfait de sa propre conception. Pour ce faire, l'enseignant doit créer un conflit cognitif en confrontant l'élève avec de l'information qui contredit sa conception et qu'il ne parvient pas à expliquer. Toutefois, plusieurs tentatives de conflit cognitif peuvent être nécessaires avant d'obtenir une insatisfaction suffisante pour entraîner un changement conceptuel. En effet, l'accommodation étant l'une des réponses aux anomalies les plus exigeantes cognitivement, les élèves tenteront plutôt d'assimiler les informations dissonantes avant de modifier leurs conceptions. Ce phénomène a d'ailleurs été décrit par le principe de dissonance cognitive formulé par Festinger (1957) et par le paradoxe de l'assimilation d'Ohlsson (2009).

Une fois l'apprenant suffisamment insatisfait de sa conception, la nouvelle conception enseignée devra respecter trois autres critères pour provoquer un changement conceptuel réussi chez l'élève. Ainsi, selon le second critère, la conception en compétition se doit d'être avant tout intelligible, c'est-à-dire qu'elle est bien comprise

par l'élève et qu'elle permette de mieux conceptualiser le monde. Le troisième critère stipule que la nouvelle conception doit ensuite être jugée plausible. Elle doit donc pouvoir expliquer les phénomènes déjà connus en plus d'être cohérente avec les autres connaissances de l'élève. Le dernier critère s'attarde au caractère fécond de la nouvelle conception qui doit permettre la compréhension de nouveaux phénomènes. Tous ces critères sont grandement influencés par l'écologie conceptuelle de l'élève, c'est-à-dire l'ensemble des analogies, des anomalies, des croyances épistémologiques et métaphysiques et des connaissances que l'élève utilise pour élaborer sa conception.

Malgré les reproches faits à l'approche « classique » décrite par le modèle de Posner et ses collaborateurs, celle-ci a eu une influence importante sur les recherches en éducation scientifique (Tyson *et al.*, 1997). Cette influence peut s'expliquer en partie par les résultats majoritairement positifs des études utilisant cette approche et par la simplicité des recommandations pédagogiques qui en découlent (Potvin et Cyr, 2017). Cela n'a cependant pas empêché les chercheurs de proposer d'autres modèles, plutôt axés sur la transformation des conceptions, afin de corriger certaines de ces lacunes.

2.1.3.2 Modèle de transformation des conceptions

Dès les années 1990, les chercheurs se sont en effet orientés vers les « ressources cognitives » qui expliquent l'adhésion aux conceptions alternatives et qui contraignent le changement conceptuel (Potvin, 2017). Ces ressources cognitives sont, entre autres, considérées comme étant des « p-prims » (diSessa, 1993), des « théories-cadre » (Vosniadou, 1994), des « catégories ontologiques » (Chi, Slotta et De Leeuw, 1994), des « règles intuitives » (Stavy et Tirosh, 2000), des « intuitions fondamentales » (Brown, 1993) ou des « heuristiques » (Talanquer, 2006, 2014).

Selon cette approche, les conceptions alternatives ne formeraient pas un ensemble monolithique qui doit être modifié ou remplacé par l'apprentissage. Elles seraient plutôt formées par un assemblage d'éléments qui se coordonnent pour former la réponse, scientifiquement bonne ou mauvaise, de l'élève. L'apprentissage entraîne

alors une transformation de l'assemblage de ces éléments pour former une nouvelle conception. Ce processus est généralement lent et graduel et diffère de la vision plus radicale des modèles de remplacement des conceptions. L'intérêt des chercheurs se déplace donc vers « la nature des éléments qui sont coordonnés, aux habitudes dans l'assemblage de ces éléments ou à la conformité de cette construction par rapport à d'autres types de croyances » (Potvin, 2017, p. 56, traduction libre).

Il est intéressant de mentionner la grande variabilité dans la taille, la cohérence et la stabilité des éléments mis en cause dans chacun des modèles. Cette grande variabilité dans la granularité des conceptions est particulièrement représentée par la division entre *connaissances-en-théorie* et *connaissances-en-éléments* (Özdemir et Clark, 2007). Selon Vosniadou qui défend la position de *connaissances-en-théorie* (Vosniadou, 1994, 2002; Vosniadou et Brewer, 1992; Vosniadou et Skopeliti, 2014), les conceptions découlent des modèles mentaux que l'élève élabore pour représenter, expliquer ou prédire une situation particulière. La construction de ces modèles mentaux est toutefois contrainte par les présuppositions épistémologiques et ontologiques de la théorie²-cadre de l'élève et par la théorie spécifique qui en découle. Ainsi, les réponses des élèves sont basées sur une théorie naïve de la physique leur permettant d'être beaucoup plus stables et structurées. Par exemple, un élève peut affirmer que le chaud et le froid se transfèrent entre les objets (modèle mental), car celui-ci croit que le chaud et le froid sont des propriétés des objets (théorie-cadre). Cette croyance est d'ailleurs confirmée par la sensation différente en touchant un objet chaud ou un objet froid (théorie spécifique). Selon cette perspective, le changement conceptuel est donc plus

² Dans ce contexte, le terme « théorie » est utilisé pour dénoter une structure relationnelle et explicative et non une théorie scientifique explicite et bien formulée (Vosniadou, 1994, p. 47). Vosniadou souligne aussi qu'elles ne sont pas explicites, bien définies, ni partagées socialement et qu'elles n'ont pas le pouvoir explicatif ou la cohérence interne d'une théorie scientifique (Vosniadou et Skopeliti, 2014, p. 1430). De même, elles ne sont pas nécessairement conscientes et ne peuvent donc pas être systématiquement testées.

ardu lorsque l'apprentissage contredit la théorie-cadre et qu'il est nécessaire de modifier nos présuppositions.

À l'opposé de l'hypothèse de théorie-cadre de Vosniadou, diSessa (1993, 2008; diSessa et Sherin, 1998) argue plutôt pour la perspective de *connaissances-en-éléments*. Selon ce chercheur, l'apprentissage de la science, particulièrement la physique³, est possible grâce à la coordination de petits éléments qu'il désigne par le terme de *p-prims* (primitives phénoménologiques). Ces fragments de connaissances inaccessibles à la conscience peuvent être décrits comme des « relations causales intuitives entre deux ou plusieurs quantités ou qualités » (Bélanger, 2008, p. 73). Elles sont considérées comme primitives, car elles sont employées intuitivement sans qu'il soit nécessaire de les justifier et qu'elles forment des structures mentales fondamentales et isolées. Le qualificatif de phénoménologique réfère au fait qu'elles proviennent d'une abstraction de l'expérience découlant d'une interprétation parfois superficielle de la réalité. En résumé, les p-prims constituent des schémas facilement accessibles pour observer et expliquer le monde. Par exemple, la p-prim d'Ohm, où un agent produit un résultat en agissant contre une résistance, peut s'appliquer en électricité, en mécanique ou pour expliquer certains phénomènes concernant la pression (Potvin, 2002). Dans ce contexte, l'expertise en physique consiste à recourir aux bonnes p-prims et à parvenir à les coordonner adéquatement selon le contexte. Un changement conceptuel est donc nécessaire lorsqu'un concept ne peut être facilement expliqué par une p-prim ou qu'il demande la coordination de plusieurs p-prims.

D'autres auteurs se distinguent aussi de cette division en proposant d'autres visions des contraintes du changement conceptuel. David Brown (2014) propose notamment un modèle de structures émergentes dynamiques pour tenter de concilier les visions de connaissances-en-théories et de connaissances-en-éléments. Selon cette approche, les

³ Voir Taber (2014) pour une réflexion sur l'adaptation des idées de diSessa en chimie.

conceptions ne forment pas des structures statiques, mais sont plutôt des structures imprévisibles et en constante transformation. Ainsi, des fragments de connaissances, comme les p-primis de diSessa ou les intuitions fondamentales de Brown (1993), interagissent pour former des structures émergentes pouvant parfois être considérées suffisamment stables pour être comparées à des théories.

Pour Chi et ses collaborateurs (Chi, 1992, 2008; Chi *et al.*, 1994), les contraintes qui font obstacle au changement conceptuel proviennent plutôt des catégories ontologiques dans lesquelles les élèves classent les concepts. Dès qu'un concept est associé à une catégorie, il se voit aussi attribuer l'ensemble de ces caractéristiques. Plusieurs difficultés rencontrées en science découleraient donc du classement erroné des concepts, notamment parce qu'ils sont souvent abstraits et font donc partie de catégories ontologiques moins familières. Le classement de l'électricité dans la catégorie MATIÈRE (possède une couleur, une masse, peut se briser, etc.) alors qu'elle appartient aux PROCESSUS ÉMERGENTS (pas de début ou de fin, non causal, magnitude uniforme, etc.) représente une erreur typique des élèves (Chi *et al.*, 1994).

Chinn et Samarapungavan (2008; 2009) vont beaucoup plus loin en soulignant qu'il existe *plusieurs routes* que l'élève peut emprunter pour effectuer un changement conceptuel. Ils recensent d'ailleurs près de 40 raisons pour expliquer les difficultés à changer de croyances ou à employer correctement les modèles scientifiques. Par exemple, les élèves peuvent avoir envie de trouver une réponse rapidement sans avoir toutes les informations nécessaires ou juger que les preuves qui leur sont présentées ne sont pas crédibles. Les enseignants doivent donc être attentifs à ces nombreuses difficultés et aider les élèves à prendre conscience de leurs croyances épistémologiques et de leurs processus cognitifs. De même, il est aussi recommandé d'encourager l'utilisation exhaustive des modèles par les élèves afin de les aider à mieux les manipuler.

Bien que les nombreux modèles de reconstruction divergent et sont même parfois perçus comme des compétiteurs, ils partagent néanmoins plusieurs points en commun (Potvin et Cyr, 2017). Tout d'abord, ils accordent tous une grande importance à la description des processus qui génèrent et modifient les conceptions des élèves. Ensuite, ils facilitent grandement le travail des enseignants en limitant les objets conceptuels à confronter lors de l'enseignement. En effet, il est beaucoup plus facile de prévoir les quelques p-prims ou théories-cadre qui risquent d'entraver le raisonnement des élèves que l'ensemble des conceptions alternatives qu'ils pourraient exprimer.

Finalement, bien que l'idée de coexistence des conceptions soit parfois abordée par certains auteurs (Brown, 1993; Vosniadou et Skopeliti, 2014), les différents modèles de cette catégorie considèrent généralement le retour aux conceptions initiales comme étant une preuve que le changement conceptuel n'est pas complété. En effet, l'idée même de reconstruction sous-entend que les conceptions initiales⁴ ont été modifiées et qu'elles ne devraient pas interférer une fois l'apprentissage complété. La persistance des conceptions initiales est donc fréquemment interprétée comme étant un signe que l'apprentissage n'est pas terminé et que le changement conceptuel n'est pas durable. Les modèles de la dernière catégorie, basés explicitement sur la coexistence des conceptions, se distinguent ainsi des modèles de reconstruction en considérant que ce retour en arrière est une caractéristique de l'apprentissage et ne doit donc pas être considéré comme une anomalie.

2.1.3.3 Modèle de coexistence des conceptions

Bien que son influence soit demeurée marginale, l'hypothèse de la coexistence des conceptions a été soulevée dès les années 1980 et 1990 (Linder, 1993; Mortimer, 1995; Solomon, 1983; Spada, 1994). Cet angle employé pour conceptualiser le changement

⁴Le terme « conception initiale » désigne ici le résultat de la coordination des différents éléments cognitifs postulés par les modèles.

conceptuel découle entre autres de l'accumulation d'indices qui démontrent que les élèves ont énormément de difficulté à abandonner leurs conceptions alternatives. En 1994, Reinders Duit écrivait « [qu'il] n'existait aucune étude [...] où une conception particulière d'un élève [...] est complètement effacée et remplacée par une nouvelle idée [...] les anciennes idées demeurent essentiellement "vivante" dans certains contextes particuliers » (Duit, 1994 cité dans Tyson *et al.*, 1997)⁵.

De même, certains auteurs ajoutent que les conceptions alternatives des élèves peuvent être utiles dans certains contextes et qu'il peut même être contre-productif de vouloir les effacer. En effet, elles peuvent constituer un cadre de référence utile en société (Solomon, 1983) et facilitent grandement la prise de décision en fournissant des heuristiques efficaces dans plusieurs contextes quotidiens (Potvin, 2011). Mortimer avance d'ailleurs que « [...] supprimer les conceptions alternatives peut signifier la suppression du bon sens (*common-sens thought*) et de son mode d'expression, le langage quotidien, qui est la façon la plus complète de partager une même signification dans une culture [...] » (Mortimer, 1995, p. 10, traduction libre).

Par exemple, selon le modèle de *domaines de connaissance* de Solomon (1983, 1984), plusieurs conceptions alternatives constituent des connaissances socialisées qui se développent grâce à l'interaction avec la société. Elles forment donc un cadre de référence qui permet aux élèves de communiquer et de comprendre quelqu'un qui affirme que « le froid risque d'entrer dans la maison si la porte est ouverte ». Ces conceptions alternatives se retrouvent donc fréquemment renforcées par le discours quotidien. Par conséquent, il n'est pas étonnant de constater leur résistance au changement. Pour Solomon, la réussite de l'apprentissage de la physique ne découle donc pas de « [...] l'abstraction de la physique "pure" ni de la lutte pour éliminer les [conceptions alternatives], mais par la fluidité et le discernement avec lesquels on

⁵ Il réitère d'ailleurs ce constat plusieurs années plus tard (Duit et Treagust, 2012).

apprend à naviguer entre ces deux domaines distincts de connaissances » (Solomon, 1983, p. 59, traduction libre).

De son côté, Edouardo Mortimer (Mortimer, 1995; Mortimer et El-Hani, 2014) propose qu'une nouvelle connaissance puisse être apprise de façon indépendante des connaissances antérieures. Ainsi, les conceptions alternatives n'entrent pas nécessairement en contradiction avec la conception à acquérir et ne sont pas obligatoirement effacées. Il suggère donc l'idée de *profils conceptuels*, inspiré des travaux de Bachelard (1940), pour décrire cette particularité de l'apprentissage. Le profil conceptuel permet d'illustrer les différentes façons de représenter un concept ainsi que la fréquence d'utilisation de chacune de ces perspectives. Par exemple, le concept de la masse peut être à la fois perçu selon le réalisme naïf (une masse de documents), l'empirisme (masse mesurée par une balance), le rationalisme classique (physique newtonienne) ou le rationalisme moderne (physique quantique). Le profil conceptuel d'un individu varie donc en fonction de son expérience personnelle, sa culture et ses croyances épistémologiques et ontologiques.

L'enseignement basé sur les profils conceptuels vise deux objectifs principaux. Tout d'abord, l'élève doit acquérir la nouvelle division d'un concept. Celui-ci gagne alors une nouvelle façon d'expliquer le concept, mais n'abandonnera pas l'ancienne version. Cette acquisition peut se faire sans aucune référence aux divisions déjà acquises puisqu'elles sont épistémologiquement et ontologiquement différentes. Cependant, il arrive que ces divisions forment un obstacle épistémologique ou ontologique et entravent l'apprentissage. Le rôle de l'enseignant est donc d'identifier les obstacles potentiels et d'aider les élèves à les surmonter. L'auteur souligne que cette démarche ne peut pas se faire de façon séquentielle et qu'il n'existe pas de règle générale pour surmonter ces obstacles. D'ailleurs, ceux-ci sont intrinsèques à l'apprentissage et ne peuvent donc pas être évités. Il ne s'agit toutefois pas de l'étape la plus difficile de l'apprentissage. En effet, une fois que les divisions ont été apprises, l'élève doit prendre

conscience de son profil et parvenir à comparer et évaluer les divisions. Il doit donc être conscient des limites de chacune et délimiter leur utilisation. Le recours à la métacognition est d'ailleurs un excellent moyen d'aider les élèves à y parvenir.

Stellan Ohlsson (2009) propose plutôt le mécanisme de *résubsumption* pour expliquer le changement conceptuel. Ohlsson souligne que les modèles basés sur le conflit cognitif souffrent du « paradoxe de l'assimilation » (Ohlsson, 2009, p. 22). En effet, puisque toutes les nouvelles informations sont interprétées à l'aide des connaissances antérieures, les anomalies censées entraîner le changement conceptuel le sont aussi. Il est ainsi possible d'assimiler une information contradictoire sans devoir effectuer une accommodation majeure de ses conceptions antérieures. Dans certains contextes, tenter de déclencher un conflit cognitif peut même conduire à augmenter la crédibilité de la conception erronée.

Pour contourner ce paradoxe, Ohlsson propose le processus de résubsumption où « [...] un phénomène ou un domaine d'expérience [est nouvellement associé] à une théorie, intuitive ou explicite, qui a initialement été développée pour représenter un autre phénomène » (Ohlsson, 2009, p. 23). La bissociation, déclencheur de ce processus, se produit lorsque l'apprenant constate qu'une théorie peut être utilisée dans un autre domaine. Il se crée alors une compétition entre les deux théories qui pourra être réglée grâce à l'évaluation compétitive de leur utilité cognitive. L'utilité cognitive tient compte du coût et des bénéfices de l'utilisation de chacune des théories. Le choix d'une théorie « n'est donc pas directement basé sur sa véracité ou sa conformité avec les preuves, mais plutôt sur son efficacité à recourir à des processus cognitifs ayant une faible charge cognitive et pouvant être complétés rapidement avec un haut taux de satisfaction » (Ohlsson, 2009, p. 29).

Les recommandations pédagogiques de ce modèle consistent donc à faire en sorte que l'élève utilise la théorie voulue dans un contexte où son utilité cognitive est favorisée. Poussée à son maximum, cette recommandation s'avère assez inhabituelle et contraire

à l'idée d'ancrer l'apprentissage dans le quotidien des élèves. En effet, Ohlsson propose plutôt de débiter l'enseignement dans un domaine où les élèves possèdent peu de conceptions initiales. Par exemple, la physique newtonienne gagnerait à être enseignée à l'aide d'une simulation d'un monde non familier pour les élèves dans lequel les lois de Newton s'appliquent comme sur la Terre. Dans ce contexte, l'utilité cognitive des lois de Newton est grandement favorisée, car il n'y a pas de conceptions alternatives (physique aristotélicienne) dont l'utilité cognitive est plus élevée. Ce n'est qu'après que les élèves ont bien compris (autant conceptuellement que mathématiquement) les lois de Newton dans ce monde imaginaire que l'enseignant peut les appliquer à des contextes réels et entamer le processus de résubsumption.

Finalement, le modèle de *prévalence conceptuelle* défendu par Patrice Potvin (2013, 2017) est l'un des rares modèles, avec celui des règles intuitives (Babai et al., 2015; Babai et al., 2014; Stavy et Babai, 2010; Stavy et Tirosh, 2000), à s'inspirer des études en neuroimagerie et en chronométrie mentale (dont certaines seront présentées à la section 2.2.3). De plus, ce modèle souligne explicitement le rôle de l'inhibition dans la capacité à surmonter les conceptions alternatives. Selon cette approche, l'enseignant doit fournir les conditions nécessaires au développement de cette habitude chez ses élèves et ainsi favoriser et maintenir l'utilisation de la conception scientifique. L'auteur propose alors trois étapes pour adapter son enseignement et optimiser la prévalence de la conception désirée.

Tout d'abord, l'enseignant doit s'assurer que la conception scientifique soit disponible pour l'élève. Elle doit donc être intelligible et représenter une solution intéressante avant la présentation d'informations dissonantes. Le conflit cognitif ainsi créé trouvera alors tout son sens puisque l'élève possède déjà une autre réponse plausible à laquelle se raccrocher. Cette suggestion permet d'ailleurs de contourner le paradoxe de l'assimilation mentionné par Ohlsson (2009).

Toutefois, le modèle de la prévalence conceptuelle ne se prononce pas sur la meilleure approche pour enseigner la nouvelle conception et la rendre disponible. Cet élément se reflète d'ailleurs dans la définition proposée des conceptions alternatives qui invitent implicitement à s'inspirer des autres modèles de changement conceptuel⁶ :

Tout objet conceptuel (heuristique, règle intuitive, p-prim, cadre ontologique ou conception) pouvant empêcher les apprenants de produire des réponses scientifiquement correctes ou de performer dans certains contextes peuvent produire des conceptions erronées [...]. Ainsi, nous considérons que les conceptions erronées sont tous les produits (réponses, justifications, performances) visibles et observables de la mobilisation et des combinaisons de toutes sortes de ressources cognitives et d'information (Potvin et Cyr, 2017, p. 4, traduction libre).

Une fois la conception désirée bien établie, il est possible de passer à l'étape suivante qui consiste à proposer des « signaux d'arrêt » (*inhibitive "stop signs"*). Cette étape est proposée en réaction à l'incapacité d'empêcher totalement l'adhésion à la conception alternative et la difficulté à réduire sa crédibilité. Le centre d'attention de l'enseignant doit alors se déplacer vers les contextes où l'utilisation de ces conceptions alternatives devient problématique. Ces signaux servent à avertir l'élève des erreurs probables et des limites d'application de leurs conceptions alternatives. Dans ce contexte, le conflit cognitif ne sert plus à créer une insatisfaction, mais plutôt à aider l'élève à reconnaître les contextes conduisant aux erreurs. Cette situation permet de cesser d'augmenter la crédibilité des conceptions indésirables et fournit plutôt l'occasion d'employer la conception enseignée. Évidemment, cette étape doit être répétée plusieurs fois afin que le réflexe d'inhiber soit développé et que la conception scientifique puisse prévaloir.

La dernière étape d'un enseignement basé sur le modèle de la prévalence conceptuelle vise d'ailleurs à assurer la durabilité de la conception scientifique. En effet, il ne faut

⁶ Potvin et Cyr (2017) soulignent toutefois qu'il s'agit d'une réduction méthodologique et non épistémologique et qu'elle s'avère nécessaire pour leur étude.

pas considérer qu'un changement apparent dans les réponses des élèves soit garant d'un changement de conceptions. Les retours à la conception alternative sont fréquents et peuvent être prévenus en offrant plusieurs contextes d'application de la conception scientifique, en illustrant plusieurs types d'erreur, en consolidant les signaux d'arrêt ou en espaçant les leçons dans le temps. Il s'agit ici de renforcer suffisamment la conception scientifique afin d'assurer son automatisation et libérer les ressources cognitives permettant une meilleure compréhension et une durabilité de la conception voulue.

Selon cette vision du changement conceptuel, la grande diversité de modèles peut nous informer sur de multiples méthodes efficaces pour enseigner les concepts scientifiques. Toutefois, il importe d'accorder une grande importance à leur prévalence ainsi qu'au rôle de l'inhibition dans la faculté à surmonter les conceptions alternatives toujours présentes dans le cerveau des apprenants. Il convient donc de définir précisément ce processus et d'examiner ces caractéristiques afin de mieux saisir son rôle dans l'apprentissage.

2.2 Inhibition

La deuxième section de ce chapitre a pour objectif de définir le concept d'inhibition et d'analyser les recherches sur le sujet, particulièrement celles relatives à l'apprentissage. Plusieurs définitions ainsi que les différents niveaux d'analyse de ce concept seront présentés afin de mieux comprendre ce que l'inhibition peut représenter en éducation. Ensuite, une présentation des régions cérébrales associées à l'inhibition permettra de mieux situer le fonctionnement de ce processus cognitif en plus de faciliter l'analyse des recherches qui seront ensuite présentées afin d'étudier la relation entre l'inhibition et l'apprentissage.

2.2.1 Définition de l'inhibition

Ce concept est introduit dans la psychologie au début du 20^e siècle. Selon les premiers auteurs, l'inhibition reflétait une hiérarchisation des fonctions cognitives dans laquelle les niveaux supérieurs inhibaient les niveaux inférieurs et où un excès d'inhibition s'avérait néfaste pour l'organisme (Fanget, 2007). Freud (1926), quant à lui, parlait de l'inhibition comme étant une « limitation fonctionnelle du moi ». Ainsi, la tendance a été de considérer l'inhibition « [...] comme un trouble des fonctions sexuelles, cognitives, émotionnelles ou sociales » (Siksou, 2007, p. 22). L'inhibition serait donc responsable du caractère introverti d'une personne ou du blocage de son développement. Par contre, d'autres chercheurs ont mis l'accent sur l'aspect volontaire (même s'il est parfois inconscient) et utile de ce processus cognitif. Ce rôle positif sera d'ailleurs au centre de l'approche adoptée par cette recherche.

Afin de mieux comprendre le rôle positif de l'inhibition, il est possible de l'étudier et de le définir selon différents niveaux d'analyse. Au niveau cérébral, l'inhibition correspond à « [...] une réduction/suppression de l'activité d'une région cérébrale (ou d'un processus cognitif) activée par l'activité d'une autre région ou d'un autre processus » (Ward, 2015, p. 70). Masson *et al.* (2014) précisent cette définition en mentionnant que l'inhibition réfère, au niveau neuronal, « [...] à la capacité d'un réseau neuronal de désactiver un autre réseau neuronal qui serait autrement activé » (p. 45, traduction libre).

Au niveau cognitif, l'inhibition fait partie des fonctions exécutives qui regroupent notamment la planification, l'attention, l'anticipation et la mémoire de travail (Chan, Shum, Touloupoulou et Chen, 2008; Diamond, 2013)⁷. Le rôle des fonctions exécutives est d'intervenir pour superviser ou contrôler l'activité des différentes régions cérébrales

⁷ Il est à noter que l'inclusion de l'inhibition dans les fonctions exécutives demeure débattue, notamment par Friedman et Miyake (2017).

afin d'optimiser les performances dans des situations nécessitant l'opération de plusieurs processus cognitifs (Ward, 2015, p. 345). En ce sens, elles agissent comme un chef d'orchestre qui peut déclencher ou empêcher l'activité d'une région. Plus précisément, l'inhibition constitue un acte de contrôle exécutif « [...] qui permet à notre cerveau de résister aux distracteurs, aux interférences » (Houdé, 2008, p. 56). Ce processus de désactivation de régions cérébrales permet donc de résister et de contrôler les automatismes de la pensée qui peuvent parfois nous conduire à commettre des erreurs (Houdé, 2014a). Houdé parle d'ailleurs de « résistance cognitive » pour désigner l'inhibition.

Au niveau comportemental, l'inhibition peut être définie comme une habileté à empêcher l'expression de comportements inappropriés, dangereux ou devenus inutiles (Chambers, Garavan et Bellgrove, 2009, p. 632). En ce sens, l'inhibition est perçue comme un processus important de l'évolution et de l'adaptation (Bjorklund et Harnishfeger, 1995; Houdé, 2000; Houdé *et al.*, 2000). Ainsi, l'inhibition permettrait de répondre aux changements de son environnement en sélectionnant les stratégies les plus adaptées à chaque situation. D'ailleurs, des auteurs associent le trouble déficitaire de l'attention avec hyperactivité (TDAH) à un déficit à inhiber (Barkley, 1999; Booth *et al.*, 2005; Crosbie *et al.*, 2013; Crosbie et Schachar, 2001; Nigg, 2001).

Les définitions mentionnées permettent de faire ressortir l'aspect essentiel de l'inhibition dans l'exécution de tâches au quotidien et en contexte scolaire. L'inhibition est donc perçue comme étant une fonction cognitive positive permettant de résister aux erreurs et de permettre l'apprentissage. En effet, les recherches de Houdé et son équipe sur le sens du nombre et le raisonnement logique leur permettent d'affirmer que l'apprentissage nécessiterait en partie d'apprendre à inhiber certaines stratégies au profit de d'autres (Houdé et Leroux, 2009). Ainsi, une conception linéaire du développement, représentée par l'analogie de l'escalier popularisé par les stades de

développement de Piaget, serait remplacée par une conception dynamique où plusieurs stratégies compétitionnent (Figure 2.1).

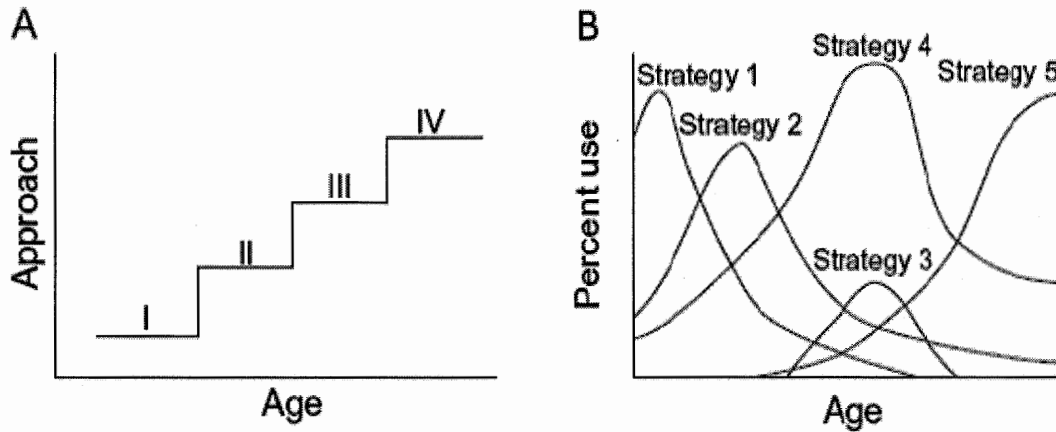


Figure 2.1 Modèles cognitifs du développement. A. Modèle piagétien en escalier et B. Modèle dynamique non-linéaire (Tiré de Lubin, Lanoë, Pineau et Rossi, 2012).

Ainsi, dans des situations où l'intuition constitue une stratégie considérée comme non valide, les erreurs relèveraient plus d'une incapacité à inhiber que de l'absence de capacités cognitives (Houdé et al., 2000). En outre, il a été démontré que l'inhibition est nécessaire afin de surmonter les réponses habituelles ou « surappries » (*overlearned*) et parvenir à sélectionner une autre réponse (Verbruggen et Logan, 2008; Ward, 2015). L'étude de l'inhibition dans des contextes éducatifs est donc pertinente, d'autant plus que les différentes stratégies d'enseignement permettraient de favoriser l'inhibition demeurent inconnues (Masson et Brault Foisy, 2014).

2.2.2 Régions cérébrales associées à l'inhibition

Afin de bien analyser les études en neuroéducation reliées à l'inhibition, il est important de connaître les régions cérébrales qui y sont associées ainsi que l'apport des neurosciences et de la psychologie qui ont permis de mieux comprendre ce processus.

Pour l'étudier, des études ont utilisé différentes tâches psychométriques où les participants doivent surmonter un conflit en bloquant une stratégie spontanée. Trois de ces tâches seront donc présentées : la tâche de Stroop, le test de Go/No Go et le test de Wisconsin.

2.2.2.1 Tâches psychométriques liées à l'inhibition

Une des tâches psychométriques souvent utilisées est la tâche de Stroop (1935). Pendant cette tâche, les participants doivent identifier la couleur du stimulus présenté à l'écran. Lors des stimuli congruents, le mot présenté à l'écran concorde avec sa couleur (ex. : rouge écrit en rouge). Cependant, lors des stimuli incongruents, le mot écrit est différent de sa couleur (ex. : vert écrit en rouge). Dans les deux cas, le participant doit répondre « rouge », bloquant parfois son réflexe de décoder le sens du mot lu.

Dans une étude utilisant la tâche de Stroop et la tomographie par émission de positrons (TEP), une technique d'imagerie cérébrale qui mesure le signal d'un traceur radioactif injecté dans le sang, Pardo, Pardo, Janer et Raichle (1990) ont observé une activation plus importante du cortex cingulaire antérieur pour l'évaluation des stimuli incongruents. D'autres études ont d'ailleurs confirmé ce résultat (Bush *et al.*, 1999; Bush *et al.*, 1998; Hayward, Goodwin et Harmer, 2004).

Certains chercheurs ont aussi utilisé différentes variantes de la tâche de Stroop pour leurs recherches. Une étude récente de Song et Hakoda (2015) a comparé la tâche de Stroop à sa version inverse où les participants doivent mentionner la couleur correspondant au mot écrit plutôt que la couleur de l'encre. Ils ont remarqué que le cortex préfrontal et le cortex cingulaire antérieur sont davantage activés selon cette approche qu'avec l'approche traditionnelle. Une autre approche, le *counting Stroop* (Bush, Whalen, Shin et Rauch, 2006), s'adapte mieux au contexte de l'IRMf en plus d'être plus facile à maîtriser pour les participants. Dans cette tâche, les participants doivent identifier le nombre de mots apparaissant à l'écran. Les stimuli incongruents

sont alors composés de noms de chiffres (ex. : deux deux) alors que les stimuli congruents sont composés de mots familiers (ex. : des noms d'animaux). Il est aussi possible d'adapter cette tâche pour comparer des mots familiers à des mots à connotation négative afin d'évaluer l'influence des émotions (Whalen, Bush, Shin et Rauch, 2006). L'utilisation du *counting Stroop* par Bush *et al.* (1998) a d'ailleurs permis de souligner le rôle du cortex préfrontal dorsolatéral en plus du rôle habituel du cortex cingulaire antérieur. Cette double activation a aussi été remarquée dans plusieurs autres études (Banich *et al.*, 2000; MacDonald, Cohen, Stenger et Carter, 2000; Peterson *et al.*, 2002; Vanderhasselt, De Raedt et Baeken, 2009).

La tâche du Go/No-Go vise à mesurer l'inhibition motrice, c'est-à-dire la capacité à empêcher une action. Pour ce faire, un signal (ex. : une lettre de l'alphabet) apparaît à l'écran pour indiquer au participant d'appuyer sur un bouton. De façon aléatoire, un signal d'arrêt (ex. : la lettre X) exige que le participant retienne son mouvement. Liddle, Kiehl et Smith (2001) et Menon et ses collaborateurs (2001) ont utilisé cette tâche combinée à l'IRMf pour mesurer l'inhibition motrice. Ils ont remarqué que le cortex cingulaire antérieur, le cortex préfrontal dorsolatéral et le cortex préfrontal ventrolatéral étaient davantage activés lors de la condition No-Go. Il est toutefois important de mentionner que des études soulignent que l'activation des zones du cortex préfrontal serait dépendante de la tâche (Mostofsky *et al.*, 2003; Mostofsky et Simmonds, 2008; Simmonds, Pekar et Mostofsky, 2008). Ainsi, ces zones seraient spécialement activées lors des tâches plus complexes qui requièrent plus de mémoire de travail (ex. : si le signal d'arrêt n'est pas toujours le même).

Une autre tâche assez fréquemment utilisée est le test de Wisconsin (Eling, Derckx et Maes, 2008; Grant et Berg, 1948). Dans cette tâche, quatre cartes sont affichées à l'écran. Ces cartes possèdent trois caractéristiques qui peuvent varier : le motif (carrés, étoiles, etc.), la couleur (rouge, vert, etc.) et le nombre d'éléments présents (1, 2, etc.). Le participant doit associer une carte à l'une des quatre visibles selon une règle

inconnue (même couleur, même motif ou même nombre d'items). Après un essai, celui-ci reçoit une rétroaction lui mentionnant si son association est exacte ou non. S'il se trompe, il pourra recommencer jusqu'à ce qu'il découvre la bonne règle. Cette règle est ensuite conservée pour quelques essais avant d'être modifiée. Le participant doit donc inhiber son habitude et modifier sa stratégie pour identifier la nouvelle association recherchée.

Les travaux de la pionnière Brenda Milner (1963) et ceux plus récents d'autres chercheurs (Lie, Specht, Marshall et Fink, 2006; Monchi, Petrides, Petre, Worsley et Dagher, 2001) ont souligné le rôle du cortex préfrontal dorsolatéral et ventrolatéral ainsi que du cortex cingulaire antérieur lors du changement de stratégie pendant la tâche du Wisconsin. La méta-analyse menée en 2005 par Buchsbaum *et al.* confirme ces résultats. Toutefois, la conclusion des auteurs d'une autre revue approfondie de la littérature encourage à la prudence (Nyhus et Barceló, 2009). En effet, ils soulignent que cette tâche nécessite l'activation d'un vaste réseau de régions cérébrales. Afin d'obtenir une analyse plus précise, ils recommandent d'utiliser une tâche permettant de décortiquer chacune des étapes en augmentant le temps entre le choix de la carte et la *rétroaction*, comme dans le *Madrid Sorting Card Test* (Barceló, 2003), ou d'utiliser une technique d'imagerie ayant une meilleure résolution temporelle.

Combinées ensemble, ces différentes tâches font ressortir trois principales zones cérébrales pour l'inhibition : le cortex cingulaire antérieur (CCA), le cortex préfrontal dorsolatéral (CPDL) et le cortex préfrontal ventrolatéral (CPVL) (Garavan, Ross, Murphy, Roche et Stein, 2002). Ces zones seront donc davantage détaillées afin de mieux comprendre leur rôle dans l'inhibition.

2.2.2.2 Cortex cingulaire antérieur

Le cortex cingulaire antérieur (CCA) est la section frontale du cortex cingulaire qui entoure le corps calleux. Cette section peut ensuite être divisée en deux parties selon

leur fonction. On associe donc la partie dorsale (BA 24' et 32')⁸ au traitement cognitif alors que la partie rostrale ventrale (BA 24, 25, 32 et 33) est associée au traitement affectif (Bush, Luu et Posner, 2000). La Figure 2.2 illustre le positionnement de cette zone dans le cerveau.

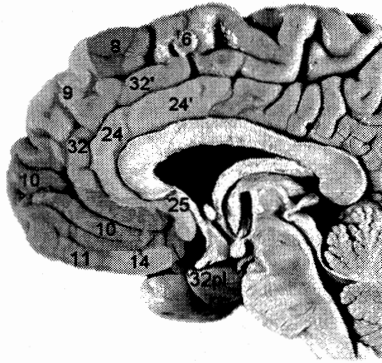


Figure 2.2 Régions cérébrales associées au cortex cingulaire antérieur (24, 25, 32 et 33) (Tiré de Mirabella, 2014, p.6)

Afin de départager le rôle du cortex cingulaire antérieur et du cortex préfrontal dans les tâches présentées ci-dessous, des chercheurs ont modifié les protocoles afin de mieux décortiquer les différentes étapes. MacDonald *et al.* (2000) ont modifié la tâche de Stroop pour différencier les activations lors de la présentation des consignes (associées avec la représentation et le maintien des consignes) de celles mesurées pendant les réponses. Ils ont observé une activation plus importante pour le CPDL lors de la présentation des consignes alors que le CCA était activé davantage lors des réponses, particulièrement lors des stimuli incongruents. Ils associent donc le rôle du CCA à la détection d'un conflit. L'étude de Lie *et al.* (2006) a, pour sa part, utilisé une version modifiée de la tâche de Wisconsin. Encore une fois, le CCA était activé de façon plus significative lors de la détection d'erreurs.

⁸ Les aires de Brodmann (BA) sont des séparations du cerveau en différentes zones basée sur l'architecture cérébrale. Le prime (') indique qu'il s'agit de la partie dorsale de l'aire de Brodmann.

L'utilisation de stimulation magnétique transcrânienne (SMT) a permis d'appuyer ce résultat. La SMT consiste à l'application d'une impulsion magnétique qui perturbe l'activité électrique des neurones. Ainsi, cette machine permet de créer une « perturbation » temporaire et inoffensive qui désactive la zone visée. Hayward et son équipe (2004) ont utilisé cet appareil afin d'affecter l'activité du CCA pendant une tâche de Stroop. Ils ont remarqué que la désactivation temporaire du CCA permettait d'accélérer les réponses (perte de l'effet Stroop), mais sans occasionner un nombre d'erreurs plus significatif. Ainsi, le CCA ne serait pas associé à une stratégie facilitant la résolution de l'effet Stroop, mais, au contraire, à une stratégie qui demande plus de ressources cognitives et qui exige donc plus de temps. La théorie de détection du conflit proposée par Botvinik permet d'expliquer ces résultats.

Selon Botvinik et ses collaborateurs (Botvinick, Braver, Barch, Carter et Cohen, 2001), le CCA contribue à la prise de décision de deux façons : (1) il envoie un signal annonçant la nécessité d'un meilleur contrôle cognitif dans le cortex préfrontal et (2) il agit comme un renforcement négatif qui incite à éviter les tâches ou les stratégies créant ce type de conflit. En somme, le CCA détecte les représentations qui sont en compétition et fournit l'information au cortex préfrontal qui pourra traiter l'information et ajuster le comportement. Bien que plusieurs recherches aient appuyé cette hypothèse, certains résultats incitent les chercheurs à revoir leur définition du rôle du CCA (Botvinick, 2007; Botvinick, Cohen et Carter, 2004). Posner et DiGirolamo (1998) proposent d'ailleurs une hypothèse différente du rôle du CCA en affirmant que celui-ci agit plutôt dans l'évaluation des retombées d'une action. Afin de concilier ces deux hypothèses, une vision intégrative (*integrative vision*) a été proposée (Shenhav, Botvinick et Cohen, 2013). Selon ces auteurs, le CCA serait responsable de l'allocation du contrôle cognitif grâce à l'évaluation de la « valeur attendue de contrôle » (*expected value of control*). Cette donnée se calcule en considérant le résultat attendu, la quantité de contrôle nécessaire et le coût en effort cognitif. Ainsi, le CCA peut évaluer « [...] s'il vaut la peine d'investir du contrôle dans la tâche, quelle quantité [de contrôle] doit

être investie et, si plusieurs tâches sont en compétition, laquelle est la plus digne d'intérêt » (Shenhav *et al.*, 2013, p. 217, traduction libre). Les auteurs précisent aussi que le CCA ne serait pas responsable de l'exécution, mais de l'évaluation subséquente du contrôle cognitif.

2.2.2.3 Cortex préfrontal dorsolatéral

Le cortex préfrontal dorsolatéral (CPDL) est une section du cortex préfrontal situé dans les aires de Brodmann 9 et 46 (Petrides, 2005) (voir Figure 2.3).

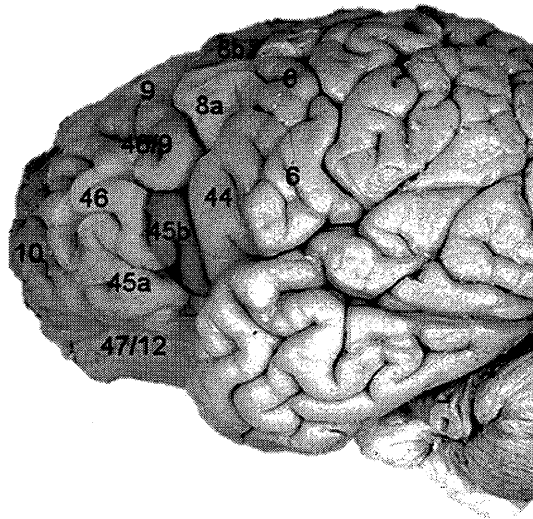


Figure 2.3 Régions cérébrales associées au cortex préfrontal dorsolatéral (46 et 9) et ventrolatéral (45 et 47) (Tiré de Mirabella, 2014, p. 6)

Puisque le cortex préfrontal est activé lors de plusieurs tâches cognitives, il est difficile de définir clairement le rôle du CPDL (Duncan et Owen, 2000). Cependant, il est généralement associé à la mémoire de travail et à la sélection entre différentes stratégies cognitives. En effet, Rowe *et al.* (2000) ont remarqué que le CPDL était activé seulement lors de la sélection d'une information en mémoire de travail. De même, Petrides (2005) et Barbey, Koenigs et Grafman (2013) mentionnent les difficultés à superviser l'information en mémoire de travail lorsqu'une lésion affecte cette région.

Miller et Cohen (2001) associent aussi le CPDL à la mémoire de travail dans leur modèle sur le fonctionnement du cortex préfrontal. Pour Curtis et D'Esposito (2003), le CPDL jouerait un rôle important afin de garder active l'information pertinente dans la mémoire de travail. Pour Blumenfeld et ses collaborateurs (Blumenfeld, Parks, Yonelinas et Ranganath, 2011; Blumenfeld et Ranganath, 2007), le cortex préfrontal dorsolatéral occuperait un rôle important dans la mémoire de travail en permettant la mise en relation et l'intégration de l'information provenant de différentes régions cérébrales. Une fois l'information ou la stratégie sélectionnée par le CPDL, celui-ci envoie l'information au cortex préfrontal ventrolatéral qui s'occupe de traiter l'information.

2.2.2.4 Cortex préfrontal ventrolatéral

Le cortex préfrontal ventrolatéral (CPVL) est situé dans le gyrus frontal inférieur dans les aires de Brodmann 45 et 47 (Petrides et Pandya, 2002) (voir Figure 2.3). Selon plusieurs auteurs, le CPVL droit serait la principale région responsable de l'inhibition. En effet, selon Aron, Robbins et Poldrack (2004), cette région serait responsable de l'inhibition motrice (*response inhibition*) ou du changement de tâche comme c'est le cas dans le test de Wisconsin. De même, plus cette région est endommagée, plus la capacité à inhiber serait réduite. Dans une version récente de leur modèle du rôle du CPVL, Aron *et al.* (2014) accorde toutefois un rôle plus large à cette région cérébrale. Selon eux, le CPVL droit (et pas le CPVL gauche) serait responsable d'appliquer un frein (brake). Ce frein aurait la particularité de pouvoir être appliqué partiellement ou complètement permettant ainsi de varier l'intensité de l'inhibition (empêcher complètement une action ou la mettre en pause). De plus, ce frein serait déclenché par des signaux externes, internes ou automatiques.

D'autres auteurs ont aussi associé le CPVL droit à l'inhibition. Dans leur revue du rôle du CPVL droit, Levy et Wagner (2011) soulèvent le rôle polyvalent de cette région cérébrale et mentionnent que celui-ci serait activé lors du changement de tâches

(*reflexive reorienting*), de l'inhibition motrice, du changement dans la planification d'une action et lors d'une décision incertaine. De Neys et ses collaborateurs (2011; 2008) soulignent aussi le rôle du CPVL dans l'inhibition d'heuristiques. Le CPVL droit a aussi été associé à l'inhibition de mots considérés socialement tabou (Severens, Kühn, Hartsuiker et Brass, 2012). Chikazo et son équipe (Chikazoe, Konishi, Asari, Jimura et Miyashita, 2007) ont montré que l'activation du CPVL droit était associée à l'inhibition motrice même lorsque la réponse se fait de façon manuelle ou visuelle. Tsujii et Watanabe (2010) ont, quant à eux, remarqué une diminution de l'activité du CPVL droit lorsque le temps de réponse à une tâche de raisonnement était diminué. Ainsi, le taux de bonnes réponses lors de l'évaluation de stimuli incongruents était plus faible. Dans une autre étude avec la même tâche, une perturbation du CPVL droit par SMT entraînait une diminution de la capacité à répondre correctement aux stimuli incongruents alors qu'une perturbation du CPVL gauche affectait plutôt la capacité à répondre correctement aux stimuli congruents en plus d'améliorer les réponses aux stimuli incongruents. Ainsi, selon ces auteurs, le CPVL gauche serait associé aux heuristiques et devrait donc être inhibé par le CPVL droit afin d'empêcher leur activation.

2.2.3 Inhibition et apprentissage

Cette section est consacrée à la présentation de diverses recherches ayant associé l'inhibition à l'apprentissage lorsque celui nécessite de résister à un automatisme (intuition, heuristiques ou conceptions alternatives). La première partie discutera d'études concernant le raisonnement logique et téléologique. Ensuite, des études plus spécifiques à la science seront abordées en physique, en biologie et en chimie.

2.2.3.1 Raisonnement logique et téléologique

La grande majorité des études sur le rôle de l'inhibition dans le raisonnement logique peuvent être interprétées par la théorie des deux systèmes de raisonnement. Selon Daniel Kahneman (2011), Jonathan Evans (2003, 2008, 2011) et plusieurs autres

chercheurs⁹ notre cerveau serait divisé en deux styles de raisonnement (*dual-process theory*). En accord avec la recommandation de Evans et Stanovich (2013), l'étiquette « Style » a été choisie au lieu de l'étiquette classique de « Système ». Celle-ci permet d'illustrer la différence qualitative entre les deux processus tout en évitant de les associer à un système neural unique. En effet, chaque style de raisonnement peut provenir de plusieurs systèmes de neurones.

Le premier style (*Type 1*), qui domine la majorité de nos raisonnements quotidiens, serait responsable des opérations automatiques, intuitives et rapides qui demandent peu d'efforts. Celui-ci peut être associé aux heuristiques et aux conceptions alternatives des élèves. Il permet donc d'obtenir rapidement une réponse, mais qui ne s'avère pas toujours exacte. Le deuxième style de raisonnement (*Type 2*), quant à lui, permet d'allouer l'attention requise aux activités mentales qui demandent plus de concentration et d'efforts, telles que l'expérience subjective de choix et de contrôle. Il permet donc d'analyser correctement la situation et d'obtenir une réponse exacte. L'effort et le temps nécessaires à utiliser ce style de raisonnement le rendent toutefois beaucoup plus difficile à utiliser. L'ensemble des caractéristiques associées à ces deux styles de raisonnement sont détaillées dans le Tableau 2 de Evans (2008, p. 257).

Selon cette théorie, plusieurs erreurs des élèves seraient dues au recours automatique et erroné du raisonnement de Style 1. Pour Kahneman (2011), le raisonnement de Style 2 peut contrôler sa propre utilisation et empêcher le recours au raisonnement de Style 1 à l'aide de l'inhibition (p. 26). L'expertise provient donc de la capacité à distinguer les contextes dans lesquels les intuitions du raisonnement de Style 1 s'appliquent (Kahneman et Klein, 2009). Houdé (2014a, 2014b) avance pour sa part l'hypothèse d'un « Système 3 »¹⁰ « [...] de "résistance cognitive" (inhibition), qui

⁹ Voir Evans (2008) et Frankish et Evans (2009) pour un survol historique

¹⁰ Dans son livre, Houdé (2014a) utilise l'étiquette de « Système » pour parler des styles de raisonnement.

permet, au cas par cas, grâce au cortex préfrontal, de bloquer le Système 1 de raisonnement pour activer le Système 2 (la logique), plus lent et réfléchi » (Houdé, 2014a, p. 64).

Outre les études de Kahneman, Evans et Houdé, d'autres études empiriques appuient l'hypothèse de la compétition entre deux styles de raisonnement et démontrent la difficulté de l'organisme à empêcher le recours intuitif au Style 1. Kelemen et Rosset (2009) se sont intéressés au raisonnement téléologique qui consiste à croire que les choses existent pour un but précis et à expliquer un phénomène en utilisant ses conséquences pour expliquer sa cause (ex. : les substances réagissent [conséquence] pour minimiser leur énergie [cause]). Sachant que les enfants ont souvent recours à ce genre d'explications, ils ont voulu savoir si les adultes déploient aussi ce raisonnement erroné. Pour ce faire, les chercheurs ont divisé aléatoirement l'ensemble de leurs participants en trois groupes disposant d'une durée différente afin de juger l'exactitude de différentes explications téléologiques ou causales. Les participants devant répondre le plus rapidement (3200ms contre 5000ms ou aucune limite de temps) ont jugé exact un plus grand nombre d'explications téléologiques. Ainsi, lorsque le temps était limité, les participants ne parvenaient pas à inhiber leur habitude intuitive à recourir au raisonnement téléologique, car ce processus est plus exigeant et chronophage. Le groupe devant répondre plus rapidement ne se distinguait toutefois pas des autres participants lors du jugement des affirmations-contrôles. Dans une étude subséquente publiée dans le même article, les auteurs ont aussi pu observer qu'une faible capacité à inhiber, évaluée grâce à une tâche de Stroop, prédisait un plus grand recours au raisonnement téléologique.

Une autre étude (Kelemen *et al.*, 2012) s'est intéressée à l'emploi du raisonnement téléologique par des professeurs en sciences à l'université. Avec la même approche que l'étude précédente, ils ont remarqué qu'ils étaient eux aussi enclins à utiliser le raisonnement téléologique lorsqu'ils ont moins de temps pour répondre et que leurs

processus cognitifs sont restreints. Bien qu'ils se distinguaient des groupes contrôles composés d'étudiants actuels ou d'anciens bacheliers du même âge, ces scientifiques professionnels ne se sont pas distingués de leurs collègues en sciences humaines. Une plus vaste culture scientifique ne semble donc pas suffisante afin de résister à nos intuitions lorsque le temps de raisonnement est limité.

Diminuer le temps de réflexion pour répondre aux questions n'est pas le seul moyen employé par les chercheurs afin de faire resurgir la tendance à utiliser le raisonnement de Style 1. Deux autres études auprès de patients atteints de la maladie d'Alzheimer démontrent aussi la persistance de ce style de raisonnement. Cette maladie a été choisie, car elle entraîne de sérieux déficits sémantiques et conceptuels. Une première étude (Lombrozo *et al.*, 2007) a démontré que les patients atteints de cette maladie étaient plus enclins, comparativement à des adultes sains, à accepter une explication téléologique. Zaitchik et Solomon (2008) ont, pour leur part, étudié le recours à l'animisme, c'est-à-dire l'attribution de la vie à des objets inanimés (ex. : croire que le soleil ou les voitures sont vivants parce qu'ils bougent). Encore une fois, les gens atteints de la maladie d'Alzheimer présentaient un plus haut taux de réponse animiste. Cependant, quelques répondants non malades ont aussi classé des objets comme étant vivants surtout lorsque les objets sont en mouvement.

Le raisonnement téléologique se retrouve aussi fréquemment dans le domaine de la chimie principalement lorsqu'une loi ou un principe permet d'expliquer la présence d'un processus chimique (Kampourakis, 2007). Ces explications aident donc l'élève à organiser ses connaissances et mieux prédire certains phénomènes. Cependant, elles peuvent aussi conduire à des généralisations abusives lorsque l'élève oublie que les systèmes ne sont pas guidés par des objectifs intrinsèques. Talanquer (2007) a analysé qualitativement huit manuels utilisés dans des cours de chimie de niveau universitaire. Son analyse fait ressortir un recours au raisonnement téléologique plus marqué lors des explications sur le second principe de thermodynamique, sur le principe de Le

Châtelier, sur la règle de l'octet et sur la théorie de répulsion des paires électroniques de la couche de valence (théorie VSEPR). Ainsi, il n'est pas rare de voir les élèves expliquer qu'une substance réagit pour « diminuer son énergie », qu'un atome donne ou reçoit un électron « pour compléter son octet » et qu'une molécule adopte une configuration particulière « afin de diminuer la répulsion des liaisons » (Talanquer, 2006). Talanquer (2007) souligne toutefois l'importance d'un langage, hérité de l'alchimie, qu'il caractérise « d'anthropomorphisme métaphorique » où des mots comme « donne », « partage », « attaque » ou « veut » sont utilisés, même par les experts, dans un but métaphorique afin d'expliquer certains phénomènes. Même si ce vocabulaire ne risque pas de disparaître des salles de classe, Taber et Watts (1996) soulignent que les novices peuvent voir ces affirmations de façon beaucoup plus littérale et que les enseignants doivent donc demeurer attentifs et tentés de fournir des explications les plus variées possible.

Il est intéressant de déterminer si le recours abusif au raisonnement téléologique est dû à un manque de détection de conflit ou bien à une incapacité à inhiber cette tendance intuitive du cerveau. De Neys, Vartanian et Goel (2008) ont voulu explorer cette question. Ils ont utilisé des stimuli inspirés de la célèbre étude de Kahneman et Tversky (1973). Dans cette expérience, les participants doivent associer une description (ex. : aime le football, la pizza et les pâtes) d'une personne sélectionnée au hasard parmi un échantillon quelconque (ex. : 5 Italiens et 995 Suédois) à l'une ou l'autre des caractéristiques présentées (ex. : Italien ou Suédois). Dans ce contexte, la description stéréotypée incite les participants à négliger la taille de l'échantillon et à répondre en conformité avec le stéréotype présenté. Le cortex préfrontal, siège de l'inhibition, était activé seulement lors des bonnes réponses qui négligent le stéréotype. Toutefois, le CCA s'activait même lorsque les participants répondaient incorrectement. Les participants détectaient donc leur biais, mais ils n'arrivaient pas à les inhiber.

Houdé et Moutier (1996, 1999) ont étudié l'effet de la pratique, de l'apprentissage logique et de l'apprentissage basé sur l'inhibition sur une tâche de raisonnement logique. Dans cette tâche, les participants devaient indiquer quelles cartes permettent de falsifier la règle logique présentée à l'écran. Selon leurs résultats, l'apprentissage basé sur l'inhibition a été la meilleure approche afin de modifier le raisonnement des participants et leur permettre de résister à leur biais perceptuel. Plus tard, cette même équipe a utilisé la tomographie par émission de positrons pour visualiser l'effet de l'apprentissage basé sur l'inhibition (Houdé *et al.*, 2000). Ils ont observé un déplacement marqué de l'activité cérébrale de la région postérieure du cerveau (région associée à la perception visuelle) vers la région frontale (région associée aux fonctions exécutives et à l'inhibition) à la suite de la séance d'apprentissage.

Le raisonnement mathématique était aussi au cœur de nombreuses recherches de Stavy, Babai et leurs collaborateurs. Ces chercheurs ont combiné l'étude du temps de réponse et l'imagerie cérébrale lors de la résolution de tâches sur la comparaison d'aires et de périmètres en géométrie (Babai, Eidelman et Stavy, 2012; Babai, Levyadun, Stavy et Tirosh, 2006; Babai, Shalev et Stavy, 2015; Babai, Zilber, Stavy et Tirosh, 2010; Stavy et Babai, 2010) ou sur le raisonnement probabiliste (Babai, Brecher, Stavy et Tirosh, 2006). Dans tous les cas, les participants avaient recours aux règles intuitives décrites par Stavy et Tirosh (2000) entraînant ainsi un temps de réponse plus long et une exactitude plus faible pour les stimuli incongruents (lorsque le périmètre et l'aire n'évoluent pas dans la même direction ou lorsqu'un plus petit nombre de balles est associé à une plus grande probabilité de piger une balle d'une certaine couleur). L'imagerie cérébrale a permis de souligner une activation bilatérale plus importante dans le cortex préfrontal (BA 10/11 et BA 11/47) lorsque les participants surmontent correctement une interférence intuitive alors que l'utilisation d'un raisonnement intuitif entraîne une activation bilatérale plus importante dans les régions pariétales (BA 40) (Stavy et Babai, 2010). Les auteurs associent les activations pariétales aux processus automatiques et intuitifs de comparaisons perceptuelles et spatiales alors que les

activations préfrontales sont associées à la capacité à inhiber ce raisonnement automatique. L'hypothèse de l'inhibition est d'ailleurs renforcée par une autre de leurs études qui montre une corrélation entre la capacité à inhiber (mesurée grâce au *digit cancellation test*) et la capacité à surmonter l'interférence intuitive en géométrie (Babai, Younis et Stavy, 2014).

L'ensemble des études présentées jusqu'à maintenant démontrent l'importance de l'inhibition dans le raisonnement logique, et, par conséquent, dans plusieurs apprentissages scolaires. Les prochaines études permettront de mieux comprendre son rôle dans l'apprentissage spécifique des concepts scientifiques.

2.2.3.2 Inhibition et apprentissage en sciences

L'équipe de Dunbar et ses collaborateurs (Dunbar *et al.*, 2007; Petitto et Dunbar, 2004) ont été parmi les premiers à s'intéresser à la neuroéducation et l'apprentissage de la physique. Lors de la présentation à un groupe d'experts en physique de stimuli congruents avec la conception alternative de l'*impetus* (physique aristotélicienne) ou incongruents (correspondent à la vision scientifique de la physique newtonienne) représentant la chute de deux balles, ces chercheurs ont observé une activation du cortex frontal médial. Cependant, le CCA s'activait uniquement dans le cas des stimuli congruents. D'un autre côté, le CCA a été activé par le groupe de novices lors des stimuli incongruents, et ce, même si les participants répondaient correctement. Ces observations ont amené les auteurs à postuler le rôle de l'inhibition dans l'apprentissage en physique en soulignant que « [...] même lorsque le changement conceptuel semble avoir eu lieu, les étudiants ont toujours accès à leurs anciennes théories naïves et que ces théories semblent être activement inhibées plutôt que réorganisées ou absorbées dans une nouvelle théorie » (Dunbar *et al.*, 2007, p. 202, traduction libre). Leurs résultats n'ont toutefois jamais été publiés dans une revue scientifique avec comité de lecture et les détails méthodologiques (nombre de sujets, nombre de stimuli, chronométrage, paramètres liés à l'acquisition des données, type d'analyse, etc.)

demeurent inconnus. Ils ont toutefois pavé la voie à d'autres recherches qui ont tenté de reproduire les résultats obtenus.

Brault Foisy et ses collaborateurs (2015) ont utilisé le même type de stimuli pour analyser des groupes d'experts et de novices. Pour leur groupe d'experts, composés de 10 étudiants au baccalauréat en physique, des activations plus importantes du CPDL et du CPVL ont été observées lors de l'analyse des stimuli incongruents. L'activation du CPVL demeurerait significative même après une analyse par région d'intérêt (*ROI analysis*) ce qui concorde avec le rôle d'inhibition attribué à cette zone cérébrale. Aucune activation du CCA n'a toutefois été soulevée. Cette absence d'activation peut s'expliquer par une activation de cette zone par les experts et les novices annulant ainsi l'activation lors de la comparaison. Cette hypothèse appuierait ainsi l'idée que le cerveau d'un novice réalise qu'il est possiblement en train de commettre une erreur, mais qu'il ne parvient pas à inhiber la conception alternative.

Toujours en imagerie cérébrale, Masson et ses collaborateurs (2014) se sont intéressés à la conception alternative fréquente qu'un seul fil serait nécessaire afin d'allumer une ampoule. Lors de la présentation de stimuli incongruents (montrant une ampoule allumée par un seul fil), le groupe de 11 experts en physique s'est démarqué par une activation plus importante des régions associées à l'inhibition (CPDL, CPVL et CCA) en plus du gyrus angulaire droit. Cette dernière région serait associée, selon les auteurs, à la capacité à combiner les informations visuospatiales des stimuli aux informations internes encodées dans le lobe pariétal ou temporal. Ces informations pourraient être d'anciennes connaissances scientifiques. Tout comme Brault Foisy *et al.* (2015), aucune zone n'a été plus significativement activée par les novices lors de l'évaluation des stimuli incongruents. L'activation de ces zones cérébrales par les experts amène ces auteurs à appuyer le rôle de l'inhibition dans l'expertise en physique.

Mason et Just (2015) ont utilisé l'imagerie cérébrale afin de suivre l'activité cérébrale lors d'explications de plus en plus complètes du fonctionnement de différents appareils

(une balance, un extincteur, les freins d'une automobile et une trompette). Ils ont remarqué un déplacement de l'activité cérébrale du cortex occipital (zones visuelles) vers le cortex pariétal (images mentales) après une première présentation des composantes de chaque appareil. Une fois le fonctionnement complètement explicité, l'activité cérébrale se concentrait dans les régions préfrontales. Ces résultats rappellent ceux obtenus par Houdé *et al.* (2000) sur l'effet de l'apprentissage par l'inhibition pour réussir une tâche en logique.

D'autres chercheurs ont utilisé la chronométrie mentale afin de relier l'inhibition à l'apprentissage de la physique. C'est notamment le cas d'une étude sur la flottabilité (Lafortune, 2013). Dans cette étude, 684 élèves âgés de 8 à 14 ans ont comparé la flottabilité de quatre balles (bois, plomb, styromousse, verre) afin d'identifier celle qui coulerait le plus. Les résultats obtenus démontrent que le temps de réponse diminue avec l'âge, ce qui appuie l'hypothèse que la maturation des régions préfrontales reliées à l'inhibition contribuerait à la capacité à surmonter une conception alternative. Lors d'une étude ultérieure (Potvin *et al.*, 2014), 128 participants de 14 et 15 ans ont dû répondre à la même tâche. Toutefois, afin de mieux évaluer l'effet de l'interférence intuitive selon laquelle un objet plus gros coule davantage, la taille des balles variait (grosses, moyennes et petites) afin d'obtenir cinq sous-catégories de stimuli (très incongruent, incongruent, neutre, congruent et très congruent). Comme prévu, les temps de réponse étaient plus élevés pour les stimuli incongruents en suivant une progression linéaire croissante. Les stimuli très congruents étaient donc les stimuli évalués le plus rapidement alors que les stimuli très incongruents étaient ceux évalués le plus lentement. Cependant, les différences entre les stimuli très congruents et congruents et entre les stimuli très incongruents et incongruents n'étaient pas statistiquement significatives. L'amorçage négatif, qui s'intéresse à l'effet d'un stimulus sur l'évaluation du stimulus suivant, a aussi été utilisé et permet de renforcer l'hypothèse de l'inhibition (Tipper, 2001). En effet, un ralentissement plus important a été observé lorsqu'un stimulus incongruent précède un stimulus congruent. Les

participants prenaient donc plus de temps à répondre, car ils devaient réactiver l'interférence de la taille de la balle (inhibée lors de l'évaluation du stimulus précédent) pour répondre correctement au stimulus congruent qui suit.

Potvin et son équipe ont continué à utiliser cette même tâche dans deux autres études qui répliquent les résultats obtenus. La première étude a utilisé cette tâche pour évaluer l'effet de trois approches pour enseigner la flottabilité (Potvin *et al.*, 2015). La première approche d'enseignement tentait de reproduire l'approche classique du changement conceptuel en créant un conflit cognitif suivi de l'enseignement du concept scientifique. La deuxième approche, basée sur le modèle de la prévalence conceptuelle, inversait les étapes en présentant l'enseignement du concept avant le conflit cognitif. Finalement, une approche contrôle consistait à présenter deux fois le vidéo d'enseignement du concept. Lors du pré-test, les 558 élèves de 5^e ou 6^e année du primaire ont tous évalué plus difficilement et lentement les stimuli incongruents. L'ensemble des approches d'enseignement a permis d'améliorer l'exactitude des réponses et d'améliorer le temps de réponse. Ces améliorations étaient plus marquées pour les stimuli incongruents indiquant un changement conceptuel réussi. La répétition était l'approche la plus efficace pour améliorer l'exactitude des réponses, mais aussi la moins efficace pour consolider la compréhension et diminuer le temps de réponse. La tendance inverse a pu être observée pour l'approche classique qui s'est avérée la pire approche pour augmenter l'exactitude. L'ensemble de ces résultats amènent les auteurs à conclure que le conflit cognitif est utile à l'apprentissage, mais qu'une conception concurrente doit être disponible pour favoriser le changement conceptuel. Ainsi, ils appuient le modèle de la prévalence conceptuelle bien que la faible taille d'effet des résultats encourage à la prudence.

Potvin et Cyr (2017) ont utilisé cette fois-ci une analyse de *cluster* afin de décortiquer les conceptions alternatives de leurs participants (62 élèves du préscolaire, 557 élèves du primaire, 127 élèves du secondaire et 22 enseignants de science). Ils ont ainsi pu

diviser les participants selon 3 conceptions différentes : prévalence de la MASSE (un objet plus lourd coule plus), du VOLUME (un objet plus gros coule plus), de la SUBSTANCE (un objet plus dense coule plus). Cette nouvelle division des participants, couplée à l'approche transversale, a permis de suivre l'évolution de ces différentes conceptions pour fournir des informations supplémentaires aux enseignants. Ainsi, au préscolaire, les élèves adhéraient principalement à la conception du VOLUME alors que la conception de la MASSE était peu présente. Toutefois, au primaire et au secondaire, il a été possible d'observer au déclin progressif de la conception VOLUME alors que la conception de la MASSE était plus présente malgré l'apprentissage de l'influence de la densité. La grande majorité des enseignants possédait une conception scientifique bien que la conception de la MASSE continue d'affecter leurs réponses. Les auteurs suggèrent donc que la conception qu'un objet plus lourd coule plus doit être inhibée pour permettre le recours à la conception scientifique basée sur la densité.

L'étude de Shtulman et Varcacel (2012) a aussi étudié les temps de réponse pour mesurer la capacité à surmonter des conceptions alternatives dans 10 domaines différents (astronomie, évolution, fractions, génétiques, germes, matière, mécanique, physiologie, thermodynamique, ondes). Dans tous les cas, les 150 étudiants au baccalauréat en psychologie étaient beaucoup plus lents et moins aptes à évaluer correctement les affirmations incongruentes (dont la valeur VRAI/FAUX change après le changement conceptuel). Dans une étude subséquente, Shtulman et Harrington (2015) ont réussi à répliquer ces résultats et à observer un délai plus important dans l'analyse des stimuli incongruents, et ce, peu importe l'âge ou l'expertise scientifique des participants. Ils suggèrent alors que le raisonnement scientifique est contraint par des schémas de raisonnement développés durant l'enfance et qui perdurent malgré la maturation et le développement de l'expertise.

D'autres approches sont aussi possibles afin de relier le changement conceptuel en sciences et l'inhibition. Dans une étude pilotée par Kwon et Lawson (2000), 14 leçons sur la pression des gaz ont été enseignées à 210 adolescents de 13 à 17 ans afin de déterminer quel facteur avait le plus d'influence sur le gain conceptuel parmi l'inhibition (mesurée avec le *Wisconsin Card Sorting Test*), la planification (*Tower of London Test*), la capacité de discernement visuel (*Group Embedded Figures*), la mémoire de travail (*Figural Intersection Test*) et le raisonnement scientifique (*Lawson's Classroom Test of Scientific Reasoning*). Selon leurs résultats, l'inhibition arrivait en tête et expliquait 28 % de la variance. Thibault (2013) soulève toutefois deux critiques importantes quant à la méthodologie employée par Kwon et Lawson. Tout d'abord, Kwon et Lawson admettent que la fonction d'inhibition varie énormément avec l'âge lors de l'adolescence, ce qui a pu influencer les résultats obtenus. Cependant, la volonté d'étudier spécifiquement cette population explique le choix des chercheurs. De plus, les chercheurs ont utilisé des questions semblables aux exemples utilisés lors des leçons sur la pression. Il est donc probable que les participants aient simplement appris les réponses sans effectuer de changement conceptuel. Afin de consolider les résultats obtenus par Kwon et Lawson, Thibault (2013) a repris sensiblement la même méthodologie, mais avec une population adulte en plus d'utiliser le *Force Concept Inventory* (FCI) pour mesurer le gain conceptuel. Avec cette nouvelle méthodologie, l'inhibition expliquait seulement 18,2 % de la variance. Malgré ce résultat moins concluant, l'auteur conclut tout de même à un lien entre l'inhibition et le changement conceptuel.

Contrairement à la physique, le domaine de la biologie a été peu étudié. Outre les quatre sujets (évolution, germes, génétique et physiologie) étudiés par Shtulman (Shtulman et Harrington, 2015; Shtulman et Valcarcel, 2012), deux études se sont intéressées plus particulièrement au lien entre la coexistence des conceptions et le changement conceptuel en biologie. Dans cette étude (Babai, Sekal, *et al.*, 2010), les temps de réponse ont été analysés afin d'étudier la conception alternative qui consiste à

considérer les objets en mouvement comme étant vivants. Ainsi, un élève possédant cette conception pourrait croire qu'une voiture est vivante alors qu'une plante ne le serait pas. 58 participants âgés de 15-16 ans ont donc eu à classer 77 stimuli selon qu'ils représentent un objet vivant ou non. Tout comme les autres études, les participants étaient beaucoup plus lents lors de l'évaluation des stimuli incongruents en plus d'être moins exacts. Pour les neuf participants ayant répondu correctement à toutes les questions, le temps de réponse était significativement plus élevé dans la catégorie des plantes (619 ms) comparativement à la catégorie des animaux (550 ms) alors que les objets mobiles (731 ms) étaient aussi supérieurs aux objets immobiles (602 ms). La conception alternative persisterait donc malgré l'apprentissage en biologie et la capacité des élèves à classer correctement les objets. Le recours à l'inhibition pour inhiber et surmonter ces conceptions serait donc probablement nécessaire selon la conclusion des auteurs.

L'autre étude a aussi utilisé la chronométrie mentale pour étudier la notion de vivant, cette fois auprès d'étudiants au baccalauréat en psychologie (Goldberg et Thompson-Schill, 2009). Tout comme les adolescents de l'étude précédente, les étudiants avaient un taux de réussite plus faible et avaient pris plus de temps à répondre lors de l'identification des plantes que lors de l'identification des animaux. Afin de s'assurer que les participants avaient bel et bien effectué un changement conceptuel, ils ont aussi recruté des professeurs de biologie de deux universités américaines. La même conclusion a été observée, avec toutefois une taille d'effet plus faible, ce qui amène les chercheurs à conclure à la présence de conceptions qui ne sont pas effacées ou remplacées par l'apprentissage. Cependant, contrairement à Babai, Sekal *et al.* (2010), les auteurs de cette étude ne mentionnent pas le rôle de l'inhibition dans la capacité à surmonter ces conceptions.

2.2.3.3 Inhibition et apprentissage de la chimie

Parmi les 10 domaines étudiés par Shtulman et Varcacel (2012), deux étaient reliés à la chimie. En effet, les thématiques de la matière (masse, poids, densité, divisibilité et atome) et de la thermodynamique (chaleur, source de chaleur, transfert de chaleur, température et expansion thermique) ont été étudiées. Comme il a été déjà mentionné, le pourcentage de bonnes réponses pour les stimuli incongruents étaient plus bas en plus d'être plus lents à analyser.

À l'aide de quatre tests du Cambridge Neuropsychological Test Automated Battery (CANTAB), Rhodes et ses collaborateurs (2016) ont voulu déterminer l'influence de différentes fonctions exécutives (mémoire de travail spatiale, planification, inhibition motrice et flexibilité cognitive) sur l'apprentissage en chimie. 56 élèves de 12-13 ans ont suivi une courte formation sur les acides et les bases avant de participer à une activité en laboratoire et de remplir un questionnaire d'une dizaine de questions, dont sept qui évaluaient la mémorisation de faits factuels et trois qui mesuraient la compréhension conceptuelle. Les résultats aux deux parties de ce questionnaire ainsi que ceux d'un examen générique en science complété avant l'étude ont ensuite été corrélés aux résultats des tests des fonctions exécutives et modéliser à l'aide d'une régression linéaire. Ces analyses ont permis de souligner la relation significative entre la mémoire de travail spatiale, mesurée par le *Spatial Working Memory Task*, et les résultats en chimie. L'inhibition motrice, mesurée par le *Stop Signal Task*, n'était toutefois pas significativement corrélée aux résultats du questionnaire ou de l'examen générique. Sa contribution aux modèles obtenus par la régression linéaire était aussi non significative. Les auteurs avancent donc l'hypothèse que les aspects du contrôle inhibiteur nécessaires pour réussir les tâches de leur étude étaient assez matures. Ils proposent donc d'explorer différents contextes afin de mieux cerner le rôle de l'inhibition dans l'apprentissage de la science. En effet, puisque plusieurs de leurs questions évaluaient la mémorisation de faits, il est possible que leurs évaluations ne nécessitaient pas d'inhibition pour être réussies. Finalement, une étude semblable sur

l'apprentissage de la biologie (Rhodes *et al.*, 2014) a permis de souligner le rôle de la planification et de la mémoire de travail incitant les auteurs à postuler l'existence de facteurs spécifiques aux disciplines scientifiques dans la relation entre les fonctions exécutives et l'apprentissage.

Une étude de Babai et Amsterdamer (2008) a utilisé la chronométrie mentale en chimie. Ils se sont intéressés à la conception alternative qui consiste à associer les liquides à un exemple prototypique (l'eau) ou à la capacité à être versé (Stavy et Stachel, 1985) alors que les solides sont associés aux substances rigides. Ainsi, les élèves ont tendance à associer la farine à un liquide et auront plus de difficulté à identifier le miel ou la mélasse comme étant des liquides. Bien que les participants, 41 élèves de troisième secondaire, aient obtenu de bons résultats (plus de 80 % de taux de réussite pour chaque catégorie), les stimuli incongruents (liquide dense et solide en poudre) ont été plus difficiles à évaluer pour les élèves. Le taux de réussite était donc significativement plus faible en plus d'avoir pris plus de temps à analyser. En effet, les solides rigides ont pris en moyenne 884 ms pour être correctement identifiés alors que les solides en poudre ont nécessité 1461 ms. La même tendance peut être observée en analysant les résultats des liquides denses (1196 ms) comparativement aux liquides fluides (936 ms). Les conceptions alternatives semblent donc persister et influencer le jugement des élèves malgré leurs bonnes réponses.

Seulement une étude préliminaire a étudié le changement conceptuel en chimie à l'aide de l'imagerie cérébrale (Nelson *et al.*, 2007). Cette étude, dont les résultats préliminaires ont seulement été présentés lors d'un congrès, a mesuré l'activation cérébrale lors de l'évaluation de stimuli portant sur l'évaporation. La tâche, qui ne concorde pas avec la structure congruent/incongruent des autres études présentées précédemment, demandait aux participants d'identifier la représentation moléculaire adéquate de différentes substances (eau, ammoniacale et peroxyde d'hydrogène) après l'évaporation. De plus, l'affiche indique seulement qu'il s'agissait d'un protocole

événementiel et ne fournit pas davantage d'informations sur les modalités de présentation des stimuli, ni sur les réglages de l'appareil ou sur les analyses effectuées.

Un graphique représentant l'exactitude des réponses des participants permet de constater que les experts (10 participants ayant suivi plus de 4 cours de niveau collégial en chimie et ayant obtenu un résultat supérieur à 15 au Chemistry Concept Inventory de Mulford et Robinson [2002]) ont répondu correctement à 90 % des stimuli alors que les novices (9 participants avec aucune formation avancée en chimie et ayant un résultat inférieur à 15 au Chemistry Concept Inventory) avaient identifié correctement près de 25 % des stimuli. Les temps de réponse n'ont cependant pas été présentés.

Les seuls résultats d'imagerie disponibles dans leur affiche concernent les différences d'activation entre les experts et les novices. Dans le cas des novices, il a été possible d'observer une activation plus importante dans le cortex temporal inférieur et occipital (BA 18 et 37) ainsi que dans le cortex pariétal droit (BA 40 et 7). Les auteurs associent ces activations à l'utilisation d'une stratégie perceptuelle s'appuyant sur l'attention visuelle. D'un autre côté, les experts ont montré une activation supérieure dans le cortex préfrontal gauche, le gyrus frontal moyen (cortex préfrontal dorsolatéral) (BA 9) et dans le gyrus frontal inférieur (cortex préfrontal ventrolatéral) (BA 45). Cette fois, les auteurs attribuent cette activation à la mémoire de travail et à la récupération d'informations (connaissances en chimie). Cette divergence des résultats en chimie avec les précédents résultats en physique s'expliquerait, selon les auteurs, par l'apprentissage tardif des concepts en chimie et par leur nature plus abstraite et éloignée de l'expérience sensorielle.

Bien que les auteurs rejettent l'hypothèse de l'inhibition, une autre interprétation peut potentiellement expliquer les résultats obtenus :

Selon cette seconde interprétation, les novices, comme les experts, ont naturellement tendance à utiliser des stratégies perceptuelles [...]. Cependant, contrairement aux novices, les experts sont capables d'inhiber les réseaux

neuronaux reliés à cette stratégie spontanée [...] en activant les zones du cortex préfrontal pouvant être associées non seulement à la mémoire de travail et la récupération d'information, mais aussi à l'inhibition. (Masson *et al.*, 2012, p. 24, traduction libre)

L'objection majeure à cette seconde hypothèse est l'absence d'activation du cortex cingulaire antérieur qu'on retrouve habituellement lorsque l'inhibition est impliquée. Cependant, Masson *et al.* supposent que cette région était peut-être activée dans les deux cas. Ainsi, la comparaison des deux groupes (experts > novices) annule l'effet du cortex cingulaire antérieur et son activation n'apparaît donc pas comme statistiquement significative. D'autres études présentées précédemment ont d'ailleurs obtenu ce même résultat (Brault Foisy *et al.*, 2015; De Neys *et al.*, 2008). En effet, De Neys *et al.* mentionnent que les novices parviennent à détecter les erreurs, mais sans parvenir à les inhiber. Le CCA peut donc être activé lors de bonnes et de mauvaises réponses.

Un autre élément en faveur de l'inhibition est la similarité importante entre les résultats de cette étude et celles de Houdé *et al.* (2000) et de Mason et Just (2015). En effet, il est possible d'observer le même déplacement des activations des régions perceptuelles du cortex pariétal vers les régions exécutives du cortex préfrontal. Un même biais perceptuel, au détriment du raisonnement logique attendu, peut donc affecter le raisonnement des élèves novices en chimie.

Un enseignement basé sur l'inhibition et les modèles de coexistence des conceptions pourrait donc favoriser ce déplacement de l'activité cérébrale vers les régions cérébrales associées à l'expertise. Cependant, le domaine de la chimie demeure très peu étudié malgré les particularités mentionnées précédemment qui le distingue de la physique. De même, les premiers résultats disponibles sont contradictoires et ne permettent pas de cerner clairement le rôle de l'inhibition dans l'apprentissage de la chimie. Des études plus approfondies sont donc nécessaires afin de déterminer si des experts de ce domaine possèdent des conceptions alternatives qu'ils doivent inhiber.

2.3 Hypothèse de recherche

En tenant compte de la problématique à apprendre les sciences et des difficultés à proposer un modèle satisfaisant pour décrire le processus complexe et multifactoriel du changement conceptuel, il est devenu de plus en plus important d'utiliser des méthodes différentes afin de varier la nature des données collectées. D'ailleurs, l'analyse du temps de réponse par la chronométrie mentale et de l'imagerie cérébrale a notamment permis de souligner le rôle de l'inhibition dans la capacité à surmonter plusieurs conceptions alternatives en physique. Cependant, le domaine de la chimie demeure peu étudié et les quelques résultats actuellement disponibles n'apportent pas d'indications claires sur l'apport de l'inhibition dans l'apprentissage de cette discipline. Ainsi, cette recherche vise à pallier cette incertitude et à répondre à la question suivante : *est-ce que les experts en chimie possèdent des conceptions alternatives qu'ils doivent inhiber au moment de produire des réponses scientifiques?*

L'hypothèse de recherche, basée sur les résultats en physique (Brault Foisy *et al.*, 2015; Masson *et al.*, 2014; Potvin *et al.*, 2014; Shtulman et Harrington, 2015; Shtulman et Valcarcel, 2012) et sur les résultats préliminaires en chimie (Babai et Amsterdamer, 2008; Nelson *et al.*, 2007), est que l'inhibition sera aussi essentielle à l'apprentissage de la chimie. De ce fait, il sera possible d'observer une activation des régions associées à l'inhibition (cortex préfrontal dorsolatéral et cortex préfrontal ventrolatéral) chez des experts en chimie lorsqu'ils répondent correctement aux stimuli incongruents. La comparaison (stimuli incongruents > stimuli congruents) permettra de faire ressortir cette activation. De plus, l'activation du cortex cingulaire antérieur est aussi attendue, bien que les résultats antérieurs démontrent qu'elle n'est pas nécessairement requise pour conclure à la présence d'inhibition.

Un rôle important de l'inhibition en chimie indiquerait que les conceptions alternatives coexistent aussi dans cette discipline, ce qui viendrait appuyer les modèles de changement conceptuel inspirés de la coexistence des conceptions. En effet, il serait

alors pertinent d'étendre les recommandations pédagogiques de ces modèles à l'apprentissage de la chimie. De même, les recherches en didactique de la chimie pourront aussi bénéficier d'un résultat positif de cette étude en considérant le rôle de l'inhibition dans divers aspects de l'apprentissage de la chimie, tels que la relation du triplet (Johnstone, 1982; Taber, 2013; Talanquer, 2011; Towns, Raker, Becker, Harle et Sutcliffe, 2012) et le recours aux heuristiques (Taber, 2014; Talanquer, 2014).

Les conséquences d'un rejet de l'hypothèse de l'inhibition pourraient être tout aussi importantes. Effectivement, cela pourrait signifier, même si des études supplémentaires seraient nécessaires pour le confirmer, que la chimie se distingue de la physique et qu'il n'y a donc pas de « signature neuronale » générique pouvant expliquer le changement conceptuel. Il faudra alors différencier son enseignement selon la discipline. De même, le rejet de l'inhibition peut permettre de souligner l'apport d'un autre processus cérébral, comme la visualisation spatiale, pour expliquer l'expertise en chimie. Des recommandations différentes découleraient donc de ce type de résultats inattendus.

CHAPITRE III

MÉTHODOLOGIE

Ce chapitre présente les éléments du devis méthodologique de cette recherche qui cherche à déterminer si des experts en chimie doivent toujours inhiber des conceptions alternatives. Tout d'abord, une description des participants permettra de souligner les critères de la population choisie et les modalités de sélection et de recrutement. Ensuite, la collecte de données sera explicitée en justifiant le choix de l'imagerie cérébrale (IRMf) et en décrivant la tâche cognitive utilisée. De plus, une séance typique d'IRMf sera aussi détaillée. Les différentes étapes de prétraitement et de traitement des données permettront de décrire l'analyse des données. Finalement, les considérations éthiques concernant le consentement et la confidentialité des participants seront mentionnées.

3.1 Participants

3.1.1 Critères généraux de sélection

Tout d'abord, les participants sélectionnés devaient être considérés comme des experts en chimie, c'est-à-dire qu'ils puissent surmonter correctement la majorité des conceptions alternatives. Afin de garantir cette expertise, les participants sélectionnés étaient tous des enseignants de chimie au Cégep ou à l'université avec au moins 5 années d'expérience. Ce choix avait pour objectif de s'assurer que les participants étaient des enseignants expérimentés qui sont régulièrement confrontés aux conceptions alternatives des étudiants. En effet, contrairement aux enseignants, les

chimistes professionnels travaillant dans un laboratoire risquent d'être devenus moins familiers avec le savoir scolaire au cœur de ce projet.

Les critères suivants servaient à minimiser la variabilité cérébrale inter-sujets afin d'éviter d'avoir un échantillon trop hétérogène qui risquerait de diminuer la puissance statistique des analyses. Ainsi, la préférence manuelle a été contrôlée en choisissant uniquement des participants droitiers, puisque la latéralisation des régions associées au langage présente une plus grande variabilité chez les gauchers (Josse et Tzourio-Mazoyer, 2004; Pujol, Deus, Losilla et Capdevila, 1999; Szaflarski *et al.*, 2002) alors que l'effet de la maturité cérébrale a été contrôlé en conservant uniquement les participants âgés entre 18 et 65 ans. Il a été décidé de ne pas contrôler pour le sexe des participants puisqu'il n'y a pas de comparaisons entre deux groupes et qu'un échantillonnage mixte permet de mieux généraliser à l'ensemble de la population.

De plus, tous les participants devaient remplir un formulaire de consentement (appendice A) ainsi qu'un formulaire de dépistage (appendice B) afin de valider qu'il n'avaient pas de contre-indications les empêchant de participer à une séance d'IRMf. Un montant de 20 \$ ainsi qu'un film des images de leur cerveau leur ont été remis à la fin de l'étude pour les remercier de leur participation. Un montant de 20 \$, ou de 0,40 \$/km pour les participants habitant à plus de 100 km de Montréal, a aussi été remis pour compenser leur déplacement.

3.1.2 Modalités de recrutement et échantillonnage final

Afin de limiter les déplacements des participants vers l'Unité de neuroimagerie fonctionnelle (UNF) de l'Institut universitaire de gériatrie de Montréal (IUGM) où avaient lieu les séances d'imagerie, les personnes contactées pour participer à l'étude devaient travailler dans un Cégep ou une université situé le plus près possible de Montréal. Les enseignants de la région de Montréal, de la Montérégie, de Lanaudière et des Laurentides ont donc été contactés en premier. Ensuite, une deuxième vague de recrutement a été effectuée dans les régions de la Capitale-Nationale, du Centre-du-

Québec, de l'Estrie, de la Mauricie et de Lanaudière. Au final, un peu plus de 500 personnes de 35 établissements collégiaux (privés et publics) et 8 universités ont été rejoints et invités à participer.

Trois moyens différents ont été utilisés afin de rejoindre les potentiels participants. Tout d'abord, une invitation présentant les grandes lignes du projet (appendice C) a été envoyée à leur courriel institutionnel. Ensuite, une copie papier de cette même invitation a été envoyée à tous ceux qui n'avaient pas répondu au courriel. Finalement, des appels téléphoniques ont été faits afin de contacter directement les personnes visées et qui n'avaient toujours pas répondu à l'invitation.

Un total de 19 participants se sont finalement portés volontaires et ont été recrutés pour participer. Deux participants ont dû être retirés des analyses à la suite de problèmes techniques avec les images cérébrales acquises pendant leur participation. Le tableau 3.1 résume les caractéristiques des participants.

Tableau 3.1 Synthèse des caractéristiques de l'échantillon final (n = 17)

9 femmes et 8 hommes

Moyenne de 43,2 ans (ET = 7,4)

13 enseignants au collégial et 4 professeurs d'université

Moyenne de 13,9 années d'expérience (ET = 5,5)

6 détenteurs d'un doctorat, 7 d'une maîtrise et 4 d'un baccalauréat

3.2 Collecte de données

3.2.1 Justification de l'IRMf comme technique d'imagerie cérébrale

Il existe une multitude de techniques d'imagerie cérébrale permettant l'observation du cerveau d'un participant lors de la réalisation d'une tâche cognitive. En effet, l'électroencéphalographie (EEG), la magnétoencéphalographie (MEG), la tomographie par émission de positrons (TEP), l'imagerie par résonance magnétique

fonctionnelle (IRMf) et l'imagerie optique (IO) peuvent toutes être utilisées dans le cadre de recherches en neuroimagerie. Chaque technique possède d'ailleurs ses propres avantages et inconvénients et le choix d'un appareil dépend donc des objectifs de la recherche, de la tâche à effectuer et des données à mesurer.

Pour cette recherche, l'appareil sélectionné est l'IRMf puisque cette technique possède la majorité des avantages recherchés pour la collecte de données. De plus, ses désavantages ne constituent pas des inconvénients majeurs pouvant entraver la réalisation de cette étude. En effet, l'IRMf est une technique non invasive qui ne requiert pas de marqueurs radioactifs (contrairement à la TEP). De plus, l'IRMf possède une bonne résolution temporelle (de l'ordre de la seconde) et une excellente résolution spatiale (de l'ordre du millimètre) permettant de suivre avec suffisamment de précision l'activité cérébrale des participants. Il est aussi possible de mesurer les activations en profondeur dans le cerveau ce qui permet notamment l'observation du CCA. D'autre part, les risques associés à son utilisation sont négligeables si la personne ne possède aucune contre-indication (absence de métal, femmes non enceintes, etc.). En effet, les séances d'imagerie cérébrale ne font courir aucun risque au plan médical et peuvent donc être répétées plusieurs fois. Il faut toutefois noter la présence de certains désagréments tels que le bruit de l'appareil, un certain inconfort dû au fait de devoir rester immobile pendant l'examen ou une sensation de claustrophobie. Des précautions, comme le port de bouchons pour les oreilles et la séance de pratique dans un simulateur, ont été instaurées afin de diminuer ces inconvénients.

Finalement, l'IRMf possède une meilleure précision pour mesurer la présence de l'inhibition que l'analyse des temps de réponse. En effet, le temps de réponse donne seulement une indication du temps nécessaire pour traiter un stimulus sans fournir d'informations sur les processus impliqués. Ainsi, un temps de réponse plus long n'est pas nécessairement un indicateur de la présence d'inhibition. Afin de s'assurer de la validité de la mesure, il faut donc garantir que la différence entre les deux conditions

résulte de la nécessité à inhiber. Le paradigme d'amorçage négatif est alors recommandé (Houdé et Borst, 2014; Tipper, 2001). Cependant, l'amorçage négatif requiert l'inclusion de stimuli neutres qui sont, dans ce cas-ci, semblables aux stimuli congruents et incongruents, mais qui n'ont aucune relation avec le distracteur à inhibé. Étant donné la difficulté à créer des stimuli neutres de qualité et qui correspondent à tous les critères établis pour la création des stimuli (voir section 3.2.2), il a été décidé de ne pas inclure cette approche dans ce projet. La mesure des temps de réponse a toutefois été conservée puisqu'il s'agit d'un moyen de corroborer les résultats d'imagerie cérébrale (Wilkinson et Halligan, 2004).

Une courte description du fonctionnement de l'appareil d'IRMf est nécessaire afin de mieux comprendre le contexte de l'étude et son influence sur la méthodologie employée¹¹. L'appareil d'IRMf fonctionne grâce aux différentes propriétés magnétiques des tissus du corps humain. Lors de l'acquisition d'images fonctionnelles, le signal capté par l'appareil est configuré afin d'être sensible au taux d'oxygénation de l'hémoglobine dans le sang. En effet, cette molécule possède des propriétés magnétiques différentes selon qu'elle transporte ou non de l'oxygène. Lorsqu'un voxel (l'équivalent d'un pixel en 3D et qui représente une petite partie du cerveau) est riche en oxygène (oxyhémoglobine), celui-ci émet un signal plus puissant qu'un voxel plus pauvre en oxygène (désoxyhémoglobine). On nomme ce principe l'effet BOLD (*Blood oxygen level dependent*). De façon concrète, l'activation de neurones dans le cerveau entraîne une consommation d'oxygène qui est compensée par un afflux important de sang qui augmente la concentration en oxyhémoglobine. Cette augmentation du signal est détectée par l'appareil et forme le signal à la base des images fonctionnelles. Deux caractéristiques de l'effet BOLD doivent être considérées pour interpréter les données d'IRMf. Tout d'abord, la sensibilité de l'appareil à la concentration en oxygène oblige

¹¹ Pour une description plus détaillée du fonctionnement de l'IRMf et de l'effet BOLD, il est possible de consulter différents articles ou manuel sur le sujet (Amaro et Barker, 2006; Huettel, Song et McCarthy, 2004; Matthews et Jezzard, 2004; Ward, 2015).

la comparaison entre deux états. En effet, l'ensemble du cerveau étant constamment oxygéné pendant le scan, il faut comparer l'activité cérébrale de la condition étudiée à l'activité cérébrale d'une condition contrôle correspondant à un niveau de base. Cette comparaison permet alors de ressortir les régions où l'activité était plus importante pour la condition étudiée. Ensuite, l'augmentation locale du débit sanguin en réponse à l'activité cérébrale, désignée par l'expression « réponse hémodynamique », n'est pas instantanée et prend un certain temps à revenir à son niveau de base. Cette particularité affecte la présentation des stimuli et explique notamment l'ajout de période de repos (fixation d'une croix) entre les conditions pour permettre le retour au niveau de base.

L'appareil d'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle utilisé pour cette étude est situé à l'Unité de neuroimagerie fonctionnelle (UNF) du Centre de recherche de l'Institut universitaire de gériatrie de Montréal (IUGM). Il s'agit d'un IRM Magnetom PRISMA de la compagnie Siemens dont le champ magnétique est de 3 teslas. Une antenne de 32 canaux a été utilisée pour mesurer le signal obtenu lorsque les participants répondaient à une tâche cognitive composée de plusieurs énoncés sur des conceptions alternatives en chimie.

3.2.2 Description de la tâche cognitive

La tâche créée pour cette étude est inspirée de la tâche utilisée par Shtulman et ses collaborateurs (Shtulman et Harrington, 2015; Shtulman et Valcarcel, 2012)¹². Elle a été conçue dans le logiciel E-Prime (Psychology Software Tools, Inc.) qui permet de présenter les stimuli et d'enregistrer l'exactitude et le temps de réponse des participants. Elle consiste en 40 paires d'énoncés textuels (ex : « L'atome d'or est mauve »)¹³ concernant diverses conceptions alternatives en chimie dont la validité

¹² Deux autres tâches ont aussi été utilisées dans l'appareil d'IRMf, mais ne seront pas analysées dans le cadre de cette recherche.

¹³ Voir appendice D pour la liste complète des stimuli.

scientifique doit être évaluée par les participants en répondant avec l'index de la main droite (si l'énoncé est vrai) ou le majeur de la main droite (si l'énoncé est faux).

Chaque paire d'énoncés est constituée d'un premier énoncé congruent avec l'intuition ou le sens commun. Cet énoncé devrait donc être correctement évalué par la plupart des gens, qu'ils soient novices ou experts en chimie. Le second énoncé est, quant à lui, incongruent avec l'intuition ou le sens commun puisqu'il nécessite de surmonter une conception alternative afin de sélectionner la conception scientifique et de répondre correctement. Ces énoncés étaient présentés pendant un maximum de 10 secondes selon un protocole en bloc. Ainsi, chaque bloc était formé de quatre énoncés d'une même condition, suivi d'une pause de 15 secondes. De plus, deux blocs mixtes formés d'énoncés congruents et incongruents ont été ajoutés afin d'augmenter la variabilité de la présentation des stimuli et éviter que les participants devinent la structure de la tâche. Ces blocs ne seront cependant pas analysés.

La tâche était divisée en deux sessions séparées par une courte pause d'environ une minute. Chaque session durait environ cinq minutes pendant lesquelles les participants devaient répondre à 40 stimuli (4 blocs de 4 énoncés congruents, 4 blocs de 4 énoncés incongruents et 2 blocs de 4 énoncés mixtes). Tous les stimuli et tous les blocs étaient présentés de façon aléatoire afin d'éviter un biais de présentation. Toutefois, le premier bloc de la session était toujours un bloc mixte afin d'ajouter un « bloc de pratique » aux participants et leur permettre de s'habituer à la tâche. La figure 3.1 illustre un exemple typique d'un bloc alors que la figure 3.2 décrit un exemple d'une session.

Figure 3.1 Représentation d'un bloc de la tâche

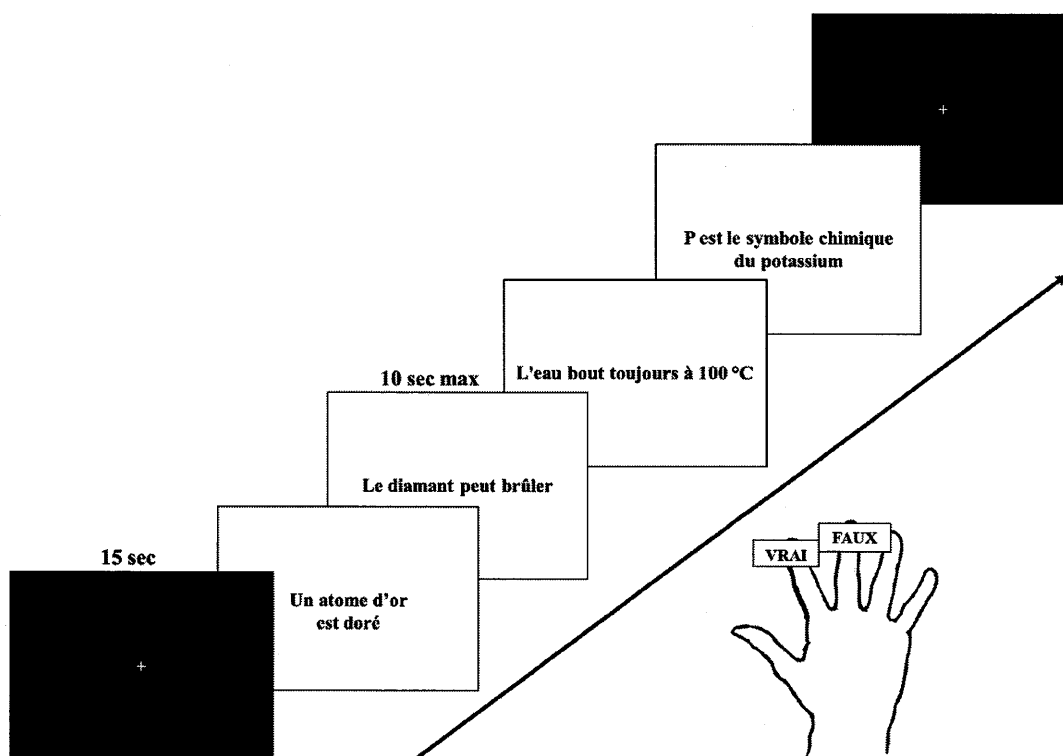
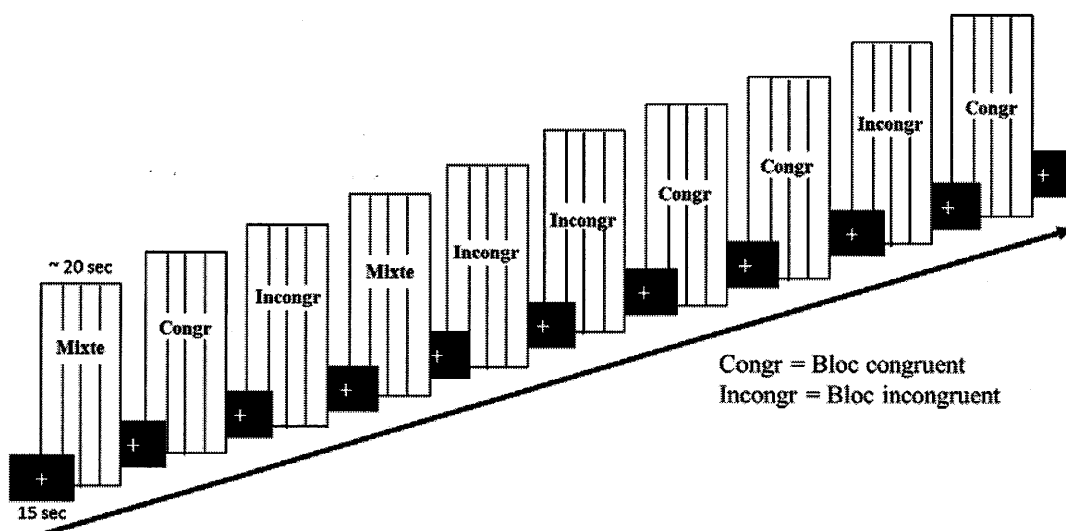


Figure 3.2 Représentation d'une session de la tâche



Plusieurs contraintes ont influencé la structure de la tâche. Tout d'abord, l'utilisation de l'IRMf nécessite d'adapter la présentation des stimuli afin d'éviter les stimuli auditifs difficilement perceptibles à cause du bruit de l'appareil (Amaro et Barker, 2006). Les stimuli devaient donc être visuels afin d'être présentés sur un écran pouvant être observé à l'aide d'un miroir. Ensuite, la position couchée des participants et l'obligation de limiter leurs mouvements justifient le recours à une boîte de réponse sur laquelle les participants peuvent répondre manuellement. Finalement, le faible ratio signal/bruit requiert un nombre minimum de stimuli par condition afin de garantir une puissance statistique significative. De même, le délai de la réponse hémodynamique nécessite une durée de présentation des stimuli suffisamment longue pour permettre l'atteinte d'un signal optimal ainsi que l'ajout de pauses entre les blocs pour laisser le retour à un signal de base. Ces critères ont donc orienté le choix de présenter des stimuli textuels selon un protocole en bloc.

En plus des critères techniques relatifs à l'utilisation de l'IRMf, des critères plus spécifiques ont aussi guidé la rédaction des énoncés afin qu'ils soient suffisamment robustes pour permettre l'approche soustractive adoptée pour analyser les données. Comme mentionné lors de la présentation de l'effet BOLD, l'analyse des données en IRMf requiert une comparaison entre deux états. Ainsi, pour cette étude, il est nécessaire de soustraire l'activité cérébrale lors de l'évaluation des stimuli congruents à l'activité cérébrale lors de l'évaluation des stimuli incongruents (incongruents > congruents). Par contre, pour que l'analyse soit fiable, il faut s'assurer que la seule différence entre les deux conditions soit due à la variable étudiée, c'est-à-dire la présence ou non d'une conception alternative à surmonter. Pour ce faire, une liste de critères a été élaborée afin de déterminer les conditions requises pour qu'un énoncé puisse faire partie des stimuli présentés (tableau 3.2).

Tout d'abord, les énoncés inclus dans la tâche devaient aborder plusieurs notions enseignées dans le cursus habituel en chimie afin d'obtenir une certaine représentativité

des concepts scientifiques prescrits dans les programmes scolaires. De plus, les énoncés incongruents devaient inclure des conceptions alternatives fréquentes chez les élèves et qui ont été recensées dans au moins un article scientifique (Les sources individuelles apparaissent dans le tableau D1). Ensuite, les réponses des énoncés ont été contrôlées afin d'être scientifiquement valides et de ne pas comporter d'ambiguïté. En effet, l'influence du contexte sur la véracité de plusieurs énoncés en chimie devait être surveillée pour éviter une mauvaise interprétation des énoncés (Taber, 2002). Cette étape a été validée grâce à la collaboration d'une experte en didactique de la chimie, enseignante de chimie au collégial et détentrice d'un doctorat en didactique des sciences sur la question des conceptions alternatives des apprenants en chimie.

En plus des critères spécifiques à chaque énoncé, les paires d'énoncés devaient aussi respecter certaines contraintes. Les énoncés congruents et incongruents d'une même paire devaient traiter du même concept scientifique et être équivalents au niveau de la familiarité et du niveau d'analyse. Ainsi, chaque modification était contrôlée afin de rester familière pour tous les participants (ex : « Le diamant peut brûler » et « Le charbon peut brûler »). De même, un énoncé incongruent abordant un aspect sous-microscopique (ex : les atomes dans une réaction) devait aussi traiter des atomes dans l'énoncé congruent qui lui est associé.

De plus, les énoncés d'une même paire devaient aussi conserver la même structure de phrase et avoir la même lisibilité. Ce dernier critère a été calculé à l'aide de la formule de lisibilité de Flesch-De Landsheere (De Landsheere et Mialaret, 1976, p. 290) qui se base sur le nombre de mots et de syllables. Finalement, la tâche contenait un nombre équivalent d'énoncés scientifiquement corrects (dont la bonne réponse est VRAI) et scientifiquement incorrects (dont la bonne réponse est FAUX) dans les deux catégories.

Afin de garantir la qualité de la tâche, les énoncés ont été validés auprès d'une trentaine d'étudiants au baccalauréat et à la maîtrise en chimie. Les énoncés ont ensuite été modifiés en tenant compte des commentaires des participants. De plus, les énoncés

moins bien réussis ont été utilisés pour former les blocs mixtes puisque ceux-ci ne sont pas analysés.

Tableau 3.2 Critères à respecter pour justifier l'inclusion des énoncés de la tâche

-
- (1) Les énoncés concernent des concepts scientifiques enseignés dans les cours de chimie.
 - (2) Les conceptions alternatives à surmonter dans les énoncés incongruents sont identifiées comme étant fréquentes dans au moins un article scientifique.
 - (3) Les énoncés sont scientifiquement valides.
 - (4) Les énoncés d'une même paire traitent du même concept scientifique.
 - (5) Les énoncés d'une même paire ont la même familiarité et le même niveau d'analyse.
 - (6) Les énoncés congruents et incongruents ont la même lisibilité.
 - (7) La tâche contient le même nombre d'énoncés vrais et d'énoncés faux.
-

3.2.3 Description d'une séance d'IRMf

Cette section a pour objectif de décrire les différentes étapes de la séance d'imagerie cérébrale suivie par les participants sélectionnés. Ces étapes ont été élaborées selon un protocole strict afin de garantir que tous les participants vivent la même expérience et reçoivent des consignes identiques. Chaque séance durait environ 2 heures dont la première heure était consacrée à la préparation du scan d'IRMf.

3.2.3.1 Étape 1 : Accueil des participants et explication de la séance

À leur arrivée aux installations de l'UNF, les participants étaient accueillis et priés de s'asseoir dans la salle d'attente. Des explications sur le déroulement de la séance leur étaient ensuite fournies avant que le chercheur prenne le temps de lire et d'expliquer le formulaire de consentement (appendice A). Une fois ce formulaire signé en trois exemplaires, le formulaire de dépistage de l'UNF (appendice B) était complété à nouveau par les participants pour garantir l'exactitude des renseignements sur leur

condition médicale. Le technologue responsable de l'IRMf révisait également le formulaire avec le participant avant l'acquisition des données pour valider qu'aucune information ne manquait. Les participants pouvaient alors changer de vêtements, remplacer leur lunette par une paire compatible avec l'IRM et passer un test de grossesse (seulement pour les participantes non ménopausées).

3.2.3.2 Étape 2 : Période d'entraînement avec le simulateur

La seconde étape de la séance d'imagerie cérébrale consistait en une période de familiarisation avec les consignes de la tâche. Les participants étaient alors invités à se diriger vers la salle de simulation. La première étape de cette période d'entraînement était réservée à la présentation, à l'oral, des consignes de la tâche. Ces consignes permettaient de présenter l'objectif de la tâche, le temps alloué pour répondre et la procédure pour répondre à l'aide de la boîte de réponse. Après avoir écouté les consignes de la tâche, les participants avaient l'occasion de s'entraîner avec 8 stimuli semblables à la tâche réelle (appendice D). Cette tâche de pratique était présentée sur un ordinateur et les participants répondaient avec une boîte de réponse semblable à celle utilisée dans l'appareil d'IRM. L'objectif de cette pratique était de s'assurer que les participants étaient familiers avec la tâche cognitive et qu'ils puissent répondre correctement. Le chercheur s'assurait donc que les participants étaient confortables avec le style des stimuli présentés, avec le rythme de la tâche, avec l'utilisation de la boîte de réponse, etc.

Une fois cette pratique complétée, la tâche était réalisée une deuxième fois dans le simulateur de l'UNF qui consiste en un appareil semblable au scanner, mais dépourvu des dispositifs d'acquisition des images. Cet appareil permet de reproduire le plus fidèlement possible le contexte de l'étude. Cette seconde pratique permettait ainsi aux participants de s'habituer davantage à la tâche en plus de valider qu'ils n'étaient pas claustrophobes et qu'ils étaient capables de répondre en demeurant le plus immobile

possible. L'ensemble de ces pratiques contribuait à diminuer l'anxiété des participants et à assurer le bon déroulement de l'étude.

3.2.3.3 Étape 3 : Période d'acquisition des images cérébrales

À la fin de la période d'entraînement, les participants étaient dirigés vers la salle de l'appareil d'IRMf. Assistés du technologue, ils recevaient les consignes spécifiques à la séance d'imagerie ainsi que la procédure pour arrêter l'expérimentation en situation d'urgence. Les participants devaient ensuite s'allonger sur la table de l'appareil et un coussin était installé sous leurs genoux. Des bouchons étaient ensuite installés dans leurs oreilles afin de diminuer le bruit important de l'appareil. Un casque d'écoute était aussi fourni aux participants pour qu'ils puissent entendre les consignes pendant le scan alors qu'un micro situé près de l'appareil leur permettait de communiquer avec le chercheur ou le technologue situé dans la salle de contrôle. Des coussins étaient également placés de chaque côté de la tête afin de minimiser les mouvements. Finalement, les boîtes de réponses (Boîte de réponses à fibre optique fORP bimanuelle à 8 boutons de Current Designs, Inc., Philadelphia, PA, États-Unis) étaient installées et le miroir était ajusté pour permettre aux participants de bien voir l'écran sur lequel était projetés les stimuli.

Pendant l'acquisition des données, les participants devaient tout d'abord effectuer les deux sessions de la tâche décrite précédemment. Chaque session durait environ cinq minutes avec une pause d'une minute entre les deux. Ensuite, les participants devaient effectuer une session d'une autre tâche d'environ cinq minutes avant le scan anatomique de neuf minutes permettant d'obtenir des images précises de leur cerveau.

L'ensemble des paramètres d'acquisition des images anatomiques et fonctionnelles sont présentés dans l'appendice E.

3.2.3.4 Étape 4 : Conclusion de la séance

Une fois la séance d'imagerie complétée, les participants étaient reconduits vers la salle d'attente pour leur permettre de se changer et de remettre leurs vêtements. Ensuite, le chercheur discutait avec les participants afin de recueillir leurs commentaires sur l'expérimentation. Finalement, un montant leur était remis pour compenser leur déplacement et les remercier de leur participation. Des vidéos des images structurales leur étaient aussi envoyés par courriel quelques semaines après la séance.

3.3 Analyse des données

Les données de cette étude se divisent en deux catégories : comportementales (temps de réponse et exactitude) et cérébrales (activité cérébrale). Avant de décrire plus en détail l'ensemble des analyses effectuées sur les données, une courte section précisera les différentes étapes de prétraitement des données cérébrales. Finalement, une brève description du modèle linéaire permettra de mieux comprendre le fonctionnement des tests statistiques sur ces mêmes données et le choix d'une analyse de second niveau sera justifié.

Le prétraitement et l'analyse des données d'IRMf ont été effectués à l'aide du logiciel SPM 8 (Wellcome Department of Imaging Neuroscience, London, UK) fonctionnant dans l'interface de MATLAB. Toutes les données comportementales ont été effectuées avec le logiciel SPSS 24.

3.3.1 Prétraitement des données cérébrales

Les différentes étapes de prétraitement des données cérébrales visent à corriger le mouvement des participants, à rassembler les images sur un cerveau de référence pour permettre les comparaisons et à augmenter le ratio signal/bruit. Les étapes de correction du mouvement, de normalisation et de lissage seront donc explicitées tout comme les

méthodes employées pour les effectuer¹⁴. Il convient, avant même de débiter les étapes de prétraitement, de s'assurer de la validité des données recueillies. Pour ce faire, il est recommandé de regarder chacune des images cérébrales dans l'objectif de détecter les artéfacts. Cette stratégie a d'ailleurs permis de retirer deux participants de l'étude puisque leurs images fonctionnelles ou structurelles comportaient des artéfacts majeurs qui auraient vraisemblablement compris les analyses subséquentes.

3.3.1.1 Correction du mouvement

La première étape de prétraitement consiste à corriger les mouvements de la tête qui subsistent malgré les précautions mises en place. En effet, un mouvement brusque d'à peine 2 mm peut nuire aux analyses. Cette étape a été réalisée à l'aide de l'algorithme développé par Friston, Williams, Howard, Frackowiak et Turner (1996) qui est inclus dans SPM 8. Cette méthode considère le cerveau comme un objet rigide, ce qui permet d'appliquer les transformations spatiales selon les axes de translation (x, y ou z) ou de rotation (roulis, tangage et lacet) afin d'aligner les images de la série à une image de référence. De cette façon, chaque activation mesurée par l'appareil demeure au même endroit dans le cerveau du participant, ce qui s'avère crucial pour les analyses.

3.3.1.2 Normalisation

La prochaine étape de prétraitement vise à permettre la comparaison entre les participants en réduisant les différences individuelles. Chaque cerveau étant unique, il est nécessaire de les rapporter sur une image de référence afin d'harmoniser les dimensions et assurer que les régions cérébrales soient aux mêmes endroits. La normalisation s'effectue en identifiant les contours du cerveau du participant et en transformant les images pour qu'elles soient similaires à l'image de référence. Pour cette recherche, nous avons employé la méthode de la segmentation décrite par

¹⁴ Une description plus complète des concepts, des justifications et des procédures soutenant chacune de ces étapes peut être trouvée dans le manuel sur l'analyse des données d'IRMf de Poldrack, Mumford et Nichols (2011)

Ashburner et Friston (2005) ainsi que le cerveau de référence du *Montreal Neurological Institute*, tous deux disponibles dans SPM 8.

3.3.1.3 Lissage

La dernière étape du prétraitement cherche à augmenter le ratio signal/bruit en répartissant le signal d'un voxel sur les voxels voisins. Ainsi, un voxel isolé voit son signal diminué, ce qui réduit les chances qu'un artéfact soit considéré significatif. De même, les activations des voxels situés dans une région cérébrale fortement sollicitée seront renforcées et réparties sur un plus grand espace. Ceci constitue un avantage lors de la comparaison entre les sujets puisque cette répartition du signal peut mieux compenser la variabilité individuelle qui n'est pas corrigée par la normalisation (Poldrack *et al.*, 2011). Dans le cadre de cette étude, le lissage a été réalisé par un filtre gaussien d'une largeur de 6 mm, à la moitié de la hauteur maximale (*full-width-half-maximum*).

3.3.2 Traitement des données

3.3.2.1 Données comportementales

Les données comportementales comportent l'exactitude des réponses ainsi que les temps de réponse et ont été analysées avec le logiciel SPSS 24. Les statistiques descriptives (minimum, maximum, moyenne, écart-type) seront mentionnées et des tests-t pour échantillons appariés seront effectués. La taille de l'effet sera aussi mesurée. Pour les temps de réponse, seuls les énoncés réussis seront utilisés pour les analyses. En effet, l'inhibition peut seulement être inférée si le participant répond correctement à l'énoncé. De plus, afin de conserver l'équivalence des conditions, l'analyse serait effectuée sur les paires d'énoncés réussis. Ainsi, pour qu'un énoncé soit conservé, le participant doit avoir fourni une bonne réponse à l'énoncé congruent et incongruent d'un même concept scientifique.

3.3.2.2 Données cérébrales

Suite aux différentes étapes de prétraitement, les analyses statistiques des données d'IRMf effectuées sur les paires d'énoncés réussis permettent de déterminer quelles régions sont plus activées lorsque les participants répondent correctement aux différents énoncés. Ces analyses sont basées sur le modèle linéaire général qui postule que le signal de l'effet BOLD mesuré par l'appareil (y) peut être représenté par la combinaison linéaire de différents facteurs (x) dont la pondération (β) varie auxquels on additionne la variabilité qui ne peut être expliquée (ϵ) (Huettel *et al.*, 2004; Poldrack *et al.*, 2011). Ce modèle est représenté par l'équation suivante :

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_n x_n + \epsilon \quad (4)$$

L'ensemble des facteurs inclus pour modéliser le signal dépend du design de l'expérience et des différentes corrections sur le mouvement effectuées lors du prétraitement. Ensuite, un test-t permet d'identifier quelles régions cérébrales sont significativement activées dans une condition par rapport à une autre.

La détermination du seuil de significativité des tests-t est une question problématique en imagerie cérébrale (Bennett, Wolford et Miller, 2009). En effet, le grand nombre de voxels à tester entraîne un risque élevé de faux positifs (erreur de type I) avec le seuil classique de $p = 0,05$. Le cas du « saumon mort », où un seuil très faible a permis de souligner des activations significatives dans le cerveau d'un saumon mort, représente bien les risques de faux positifs (Bennett, Baird, Miller et Wolford, 2010). Cependant, la correction du seuil pour les comparaisons multiples, comme la correction de Bonferroni, peut aussi résulter en un seuil trop strict ne permettant pas de détecter toutes les activations significatives (erreur de type II). Des seuils corrigés et adaptés à l'imagerie cérébrale sont donc recommandés. À moins d'avis contraires, le seuil de $p = 0,001$ a donc été choisi pour rapporter les analyses cérébrales de cette étude.

Étant donné l'objectif de la recherche qui vise à connaître l'activité cérébrale de tous les participants lorsqu'ils évaluent les stimuli incongruents, il est nécessaire d'effectuer une analyse de deuxième niveau (Masson *et al.*, 2012). En effet, l'analyse de premier niveau (intra-sujet ou à effets fixes) permet d'obtenir le portrait de l'activité cérébrale de chacun des participants. Elle est toutefois sensible aux données extrêmes et ne peut donc pas être utilisée pour généraliser les résultats à l'ensemble de la population. Pour compenser cette lacune, l'analyse de deuxième niveau (analyse à effets aléatoires) combine l'activité cérébrale de tous les participants avant de les comparer à l'aide d'un test-t. Ainsi, une région cérébrale est significativement activée seulement si elle est activée par la majorité des participants puisque les participants réagissant fortement à la tâche ne peuvent pas compenser l'activité plus faible des autres participants. Ces deux analyses, effectuées à l'aide de SPM 8, ont donc été préconisées pour cette recherche.

3.4 Considérations éthiques

3.4.1 Considérations associées à l'utilisation de l'IRMf

Le recours à l'IRMf pour cette étude a entre autres été motivé par son utilisation sécuritaire pour les participants n'ayant aucune contre-indication. Pour garantir la sécurité des participants, un test de dépistage médical (appendice B) a donc été effectué avant de les recruter.

Malgré l'aspect sécuritaire de l'appareil, quelques inconvénients ont pu causer un certain inconfort chez certains participants. Tout d'abord, ceux-ci devaient rester allongés pendant près d'une heure sans bouger à l'intérieur de l'appareil. Un coussin a donc été placé sous les jambes afin d'augmenter leur confort. De plus, l'étroitesse de l'appareil peut entraîner une sensation de claustrophobie. Finalement, le bruit important de l'appareil pouvait aussi indisposer certaines personnes malgré l'utilisation de bouchons dans l'oreille. La séance de pratique dans le simulateur avant la séance officielle a contribué à réduire ces inconvénients et diminuer le stress des participants.

3.4.2 Obtention du consentement éclairé

Tous les participants à cette étude ont participé de façon pleinement volontaire. Lors de la lecture du formulaire de consentement (appendice A), ils ont été explicitement avertis qu'ils pouvaient se retirer de l'étude à tout moment, sans aucune conséquence. Le chercheur a aussi pris le temps de préciser tous les points de ce formulaire et de répondre à l'ensemble des questions des participants.

Ce formulaire de consentement et tous les aspects éthiques et scientifiques du projet ont été approuvés par les comités éthiques de l'Université du Québec à Montréal et de l'UNF (Comité mixte d'éthique de la recherche du Regroupement Neuroimagerie/Québec, 13-14-023). Une copie signée était aussi remise aux participants.

3.4.3 Précautions pour respecter la confidentialité

La totalité des renseignements recueillis dans le cadre de ce projet de recherche demeure confidentielle. Le nom des participants a été remplacé par un code dont la clé est conservée dans un lieu sécuritaire. De même, toutes les publications ou communications scientifiques reliées à cette étude feront l'objet de précautions particulières afin de s'assurer qu'aucun élément d'information ne puisse permettre d'identifier un participant.

CHAPITRE IV

RÉSULTATS

L'objectif de ce chapitre est de présenter les résultats obtenus grâce aux analyses effectuées sur les données. La première section est consacrée aux résultats comportementaux et s'attardera à décrire le taux de réussite des participants ainsi que le temps que les participants ont nécessité pour évaluer correctement les stimuli. La section suivante détaillera les régions cérébrales ayant été significativement plus activées lors de l'évaluation des stimuli congruents et incongruents. Ces résultats seront finalement discutés et analysés dans le prochain chapitre afin de déterminer s'ils permettent de confirmer l'hypothèse du rôle de l'inhibition dans la capacité des experts à surmonter leurs conceptions alternatives en chimie.

4.1 Résultats comportementaux

4.1.1 Exactitude des réponses

L'exactitude des participants lors de l'évaluation des énoncés congruents et incongruents a été mesurée et est résumée dans le tableau 4.1. Les 17 participants ont obtenu un taux d'exactitude moyen de 96,29 % (ET = 3,44) lors de l'évaluation des stimuli congruents et de 71,47 % (ET = 11,40) pour les stimuli incongruents. Un test-t pour échantillons appariés a ensuite été effectué afin de comparer les deux conditions. Ce test a permis de souligner une différence significative, $t(16) = 9,757$; $p < 0,001$, dont la taille d'effet est très forte ($d = 2,95$) selon les critères de Cohen (1988).

4.1.2 Temps de réponse

Afin de valider l'hypothèse du rôle de l'inhibition dans la capacité à surmonter les conceptions alternatives, il est préférable de conserver uniquement les situations où les participants ont répondu correctement aux deux stimuli d'une même paire puisque l'inhibition est observable seulement lorsque les participants donnent une bonne réponse. De plus, l'équivalence des conditions permet d'éviter une surreprésentation d'une condition. Les 168 paires d'énoncés (31% des énoncés) contenant les 21 énoncés congruents et les 155 énoncés incongruents non réussis par les participants ont donc été retirées de l'analyse. Ainsi, le nombre de stimuli pour chacune des catégories est descendu à 376. L'analyse s'est ensuite concentrée sur les temps de réponse, c'est-à-dire le temps entre le début de la présentation de l'énoncé et l'instant où le participant appuie sur le bouton pour répondre.

Les caractéristiques descriptives (minimum, maximum, moyenne et écart-type) des temps de réponse se retrouvent dans le tableau 4.2. En moyenne, les participants ont pris 3058 ms (ET = 1196) à évaluer correctement les stimuli congruents et 3631 ms (ET = 1424) à évaluer les stimuli incongruents. Une différence significative a été observée à l'aide d'un test des rangs de Wilcoxon, $z = 7,796$; $p < 0,001$, dont la taille d'effet ($r = 0,40$) est moyenne.

Tableau 4.1 Exactitude des participants pour les stimuli congruents et incongruents

	N	Minimum	Maximum	Moyenne	Écart-type
Congruents	17	84	100	96,29	3,44
Incongruents	17	44	84	71,47	11,40

Tableau 4.2 Temps de réponse des participants (en ms) pour les paires dont les deux énoncés ont été correctement évalués

	N	Minimum	Maximum	Moyenne	Écart-type
Congruents	376	1295	9566	3058	1196
Incongruents	376	1285	9300	3631	1424

4.2 Résultats cérébraux

Afin de répondre à la question de recherche, l'activité cérébrale des participants pendant l'évaluation des 376 paires d'énoncés réussis a été évaluée à l'aide d'une analyse de second niveau (effets aléatoires) et à partir du cerveau entier (*whole-brain analysis*). Le choix de conserver les paires d'énoncés avait toujours pour objectif d'observer les énoncés où les participants ont pu activer l'inhibition tout en conservant l'équivalence des conditions.

Une première analyse cherchait à déterminer les régions cérébrales significativement plus activées lorsque les participants répondaient correctement aux stimuli congruents (congruents > incongruents). Aucune région cérébrale ne s'est distinguée lors de cette analyse. Ensuite, une seconde analyse s'est concentrée sur l'évaluation des stimuli incongruents (incongruents > congruents). Les résultats de cette analyse sont reportés dans le tableau 4.3 et dans la figure 4.1. Ce tableau présente les régions significativement activées, leurs coordonnées dans l'espace MNI, le nombre de voxels (k) de la région ainsi que la valeur du test-t. L'analyse de l'activité cérébrale pendant l'évaluation des stimuli incongruents a donc permis de souligner trois régions significativement plus activées. La première activation est localisée dans la région antérieure de l'aire motrice supplémentaire (pré-AMS) située dans le cortex frontal supérieur et moyen droit, la seconde activation se retrouve à chevaucher le cortex préfrontal ventrolatéral gauche et l'insula antérieure gauche alors que la dernière région est située dans le cortex préfrontal dorsolatéral.

Tableau 4.3 Régions cérébrales significativement plus activées lors de l'évaluation des paires dont les deux énoncés ont été correctement évalués

Régions cérébrales	x	y	z	k	Valeur de t
Congruents > Incongruents					
Aucune région significativement plus activée					
Incongruents > Congruents					
Aire motrice supplémentaire droite (pré-AMS)	24	9	57	26	5,47
Cortex préfrontal ventrolatéral gauche (CPVL) / Insula antérieure gauche	-27	21	-6	12	4,75
Cortex préfrontal dorsolatéral gauche (CPDL)	-27	45	42	8	5,32
Note : $p < 0,001$, non corrigé, minimum 8 voxels, analyse à effets aléatoires, coordonnées dans l'espace MNI de SPM8.					

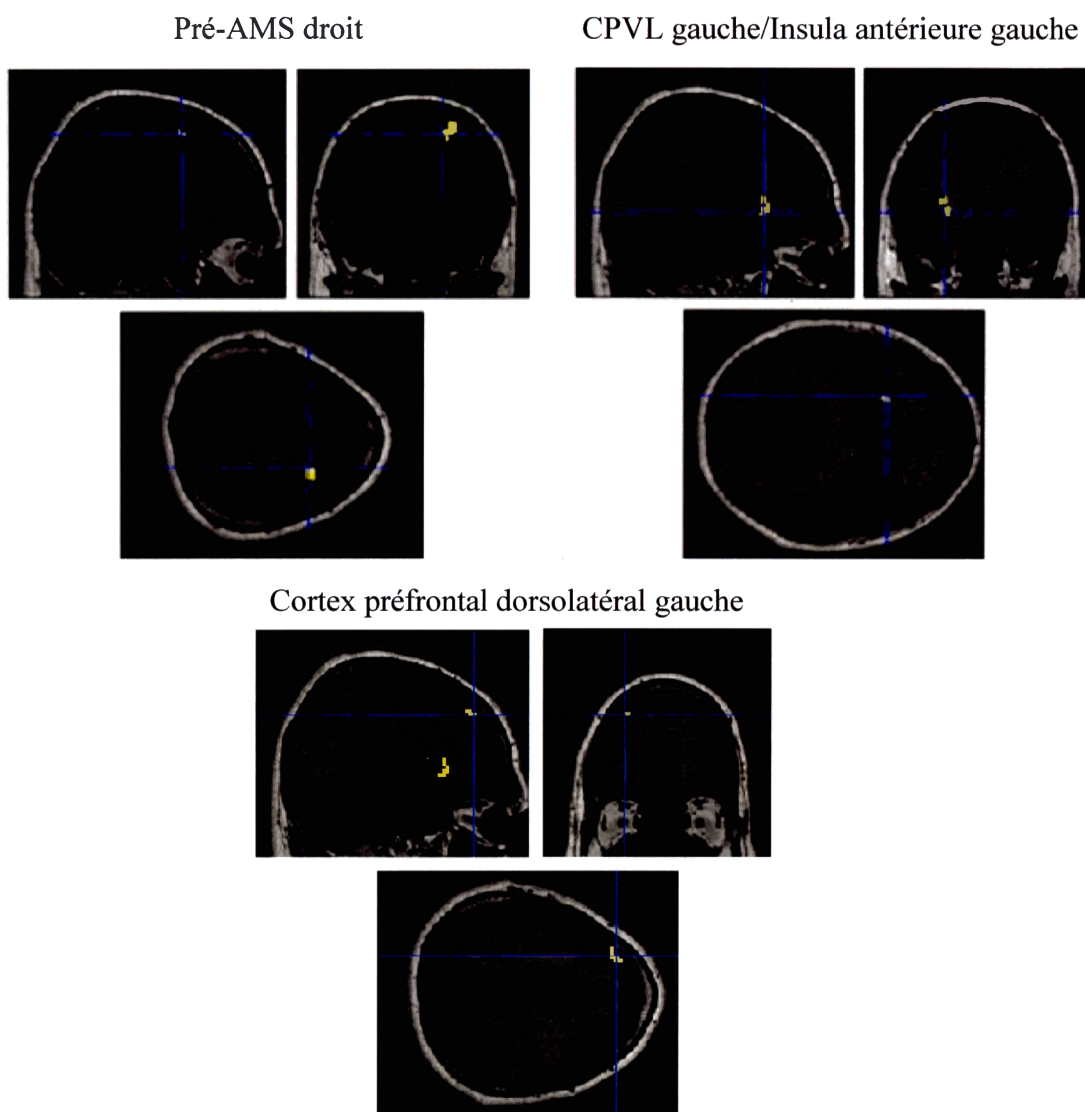


Figure 4.1 Régions significativement activées lors de l'évaluation des paires dont les deux énoncés ont été correctement évalués (incongruent > congruent; $p < 0,001$ non corrigé; minimum 8 voxels; analyse à effets aléatoires)

CHAPITRE V

DISCUSSION DES RÉSULTATS

Ce chapitre vise à analyser les résultats décrits précédemment et à déterminer si l'hypothèse de recherche s'avère exacte et que les experts en chimie ont effectivement recours à l'inhibition afin de surmonter leurs conceptions alternatives. Les résultats comportementaux seront d'abord analysés suivis des résultats de l'activité cérébrale lors de l'évaluation des stimuli congruents et incongruents. Chacune des régions significativement activées pour ces deux contrastes sera interprétée selon leur concordance avec l'hypothèse de recherche. D'autres hypothèses seront aussi envisagées afin de déterminer si elles permettent aussi d'expliquer les résultats. Finalement, les limites de cette recherche et les conséquences sur le changement conceptuel et l'enseignement des sciences qui découlent des résultats de cette étude seront aussi abordées.

5.1 Interprétation des résultats

Afin de répondre à la question de cette étude et tenter de valider l'hypothèse de recherche, il faut contraster les résultats obtenus pour l'évaluation des stimuli incongruents à ceux obtenus lors des stimuli congruents. Selon l'hypothèse avancée, les stimuli incongruents devraient être plus difficiles et plus lents à analyser correctement étant donné la nécessité de surmonter la conception alternative toujours présente dans le cerveau. De même, l'analyse des régions cérébrales devrait révéler la présence des régions couramment associées à l'inhibition (cortex préfrontal

dorsolatéral, cortex préfrontal ventrolatéral droit et cortex cingulaire antérieur) lors de l'évaluation des stimuli incongruents.

5.1.1 Résultats comportementaux

L'analyse des résultats comportementaux permet de remarquer des différences significatives entre les stimuli congruents et incongruents. Ces différences viennent d'ailleurs appuyer l'hypothèse de la coexistence des conceptions et constituent un indicateur du recours à l'inhibition pour répondre correctement aux stimuli incongruents.

Effectivement, le taux d'exactitude des réponses pour les stimuli incongruents était significativement plus bas que celui des stimuli congruents. Il semble donc que les stimuli incongruents représentent effectivement un défi plus important pour les participants et que ceux-ci ont probablement eu tendance à répondre en accord avec les conceptions alternatives. Une différence significative d'exactitude des réponses entre les stimuli congruents et incongruents avait aussi été observée dans d'autres études avec des experts en sciences (Goldberg et Thompson-Schill, 2009; Kelemen *et al.*, 2012; Shtulman et Harrington, 2015). Le résultat de cette étude vient donc renforcer les conclusions de ces auteurs qui avancent que les conceptions alternatives persistent malgré l'expertise scientifique et que l'interférence causée par les conceptions alternatives serait le symptôme d'une tendance qui se généralise à plusieurs concepts dans une multitude de domaines (Shtulman et Harrington, 2015). L'interférence causée par les conceptions alternatives ne serait donc pas spécifique à une discipline ou à un concept précis.

L'analyse des temps de réponse abonde aussi dans le sens de la coexistence des conceptions. Un délai plus important dans l'analyse des stimuli incongruents a effectivement été observé et dénote un travail cognitif plus important pour cette catégorie de stimuli. Ce résultat reproduit la tendance observée dans plusieurs études ayant analysé les temps de réponse, et ce, peu importe la discipline ou le concept étudié

(Babai et Amsterdamer, 2008; Babai, Sekal, *et al.*, 2010; Brault Foisy *et al.*, 2015; Goldberg et Thompson-Schill, 2009; Potvin *et al.*, 2014; Shtulman et Harrington, 2015; Shtulman et Valcarcel, 2012). Toutefois, l'analyse des données d'imagerie cérébrale sera nécessaire afin de confirmer que ce travail cognitif supplémentaire est dû à l'activation des régions cérébrales associées à l'inhibition.

5.1.2 Résultats cérébraux

La première étape pour analyser la concordance des résultats d'IRMf avec l'hypothèse de l'inhibition consiste à observer l'activité cérébrale lorsque les participants répondent correctement aux énoncés congruents. Selon le protocole de l'étude, ces énoncés constituent le « signal de base » et servent de référence pour isoler l'activité cérébrale associée à l'ajout d'une conception alternative à surmonter pendant l'évaluation des énoncés incongruents. Ainsi, l'ensemble des régions cérébrales activées pour répondre aux énoncés congruents devraient être aussi activées lors de l'évaluation des énoncés incongruents et aucune région cérébrale ne devrait être significativement plus activée. Les résultats se sont finalement avérés conformes à notre hypothèse puisqu'aucune région cérébrale ne s'est démarquée lors de l'analyse.

Selon l'hypothèse de recherche, une activité cérébrale plus importante est attendue dans le cortex cingulaire antérieur, le cortex préfrontal dorsolatéral et le cortex préfrontal ventrolatéral droit lors de l'évaluation des énoncés incongruents puisqu'il s'agit des régions couramment associées à l'inhibition. L'analyse de ces énoncés a finalement permis de souligner l'activation plus importante de trois régions cérébrales : le pré-SMA, le cortex préfrontal ventrolatéral gauche/insula antérieure gauche et le cortex préfrontal dorsolatéral gauche. Considérant la structure de la tâche, cette activation significative peut être attribuée au travail cognitif supplémentaire requis pour surmonter l'interférence causée par l'ajout d'une conception alternative. L'analyse des fonctions associées à chacune de ces trois régions significatives peut ainsi indiquer si l'inhibition a été nécessaire pour surmonter la conception alternative.

5.1.2.1 Concordance avec l'hypothèse de recherche

L'activation dans le cortex frontal supérieur et moyen droit correspond à l'aire motrice supplémentaire (AMS) et plus précisément à sa partie antérieure (pré-AMS). Cette région est fréquemment attribuée à la planification et à l'organisation temporelle du mouvement (Gerloff, Corwell, Chen, Hallett et Cohen, 1997; Lee, Chang et Roh, 1999; Tanji et Shima, 1994). Plusieurs études évoquent aussi son rôle dans le contrôle cognitif et notamment dans l'inhibition (Chao, Luo, Chang et Li, 2009; Nachev, Kennard et Husain, 2008; Nachev, Wydell, O'Neill, Husain et Kennard, 2007; Obeso, Robles, Marrón et Redolar-Ripoll, 2013). En effet, Aron et ses collaborateurs incluent cette région dans leur modèle sur l'inhibition bien que ce dernier ne précise pas son rôle exact (Aron *et al.*, 2014; Wessel et Aron, 2017). Simmonds, Pekar et Mostofsky (2008) ont, quant à eux, effectué une méta-analyse sur la tâche de Go/No-Go et ont observé que l'AMS droit était invariablement activée. Une autre étude a utilisé la tâche de Go/No-Go auprès d'une centaine de participants pour souligner l'activation de l'AMS (Steele *et al.*, 2013). Plusieurs méta-analyses ont aussi soulevé le rôle de cette région pendant la tâche de Stroop (Derrfuss, Brass, Neumann et Cramon, 2005; Laird *et al.*, 2005; Neumann, Cramon et Lohmann, 2008; Neumann, Lohmann, Derrfuss et Cramon, 2005). Des études lésionnelles ont aussi démontré qu'une atteinte au pré-AMS, ou au CPVL, peut affecter les performances aux tâches d'inhibition (Floden et Stuss, 2006; Picton *et al.*, 2007). De plus, une étude structurelle par Aron, Behrens, Smith, Franck et Poldrack (2007) révèle que le pré-AMS est connecté au CPVL et que ces deux régions formeraient ainsi un réseau anatomique permettant l'inhibition. L'activation significative de cette région cérébrale lorsque les participants répondent correctement aux stimuli incongruents est donc cohérente avec l'hypothèse de recherche. En effet, l'interférence de la conception alternative entraîne la nécessité de modifier sa réponse et, par conséquent, de modifier le doigt utilisé pour répondre. Ainsi, les participants devaient planifier un nouveau mouvement afin d'appuyer sur le bouton correspondant à la réponse scientifique.

La seconde région significative est majoritairement située dans l'insula antérieure gauche. Le rôle de l'insula est difficile à cerner puisque cette région serait activée lors d'une variété de fonctions telles que le traitement des émotions, de la douleur, du langage et dans les situations demandant du contrôle cognitif (Chang, Yarkoni, Khaw et Sanfey, 2013; Kurth, Zilles, Fox, Laird et Eickhoff, 2010; Singer, Critchley et Preuschoff, 2009). Ainsi, ces auteurs avancent que l'insula aurait le rôle de relier et d'intégrer les informations en provenance de plusieurs systèmes. Cette région est aussi fréquemment activée lors de la prise de décision en situation d'incertitude (Potvin, Turmel et Masson, 2014; Singer, Critchley et Preuschoff, 2009). Plusieurs auteurs ont aussi observé son activation pendant les tâches de Stroop et de Go/No-Go (Aron *et al.*, 2014; Chang *et al.*, 2013; Kurth *et al.*, 2010; Levy et Wagner, 2011; Nee, Wager et Jonides, 2007; Simmonds *et al.*, 2008). Swick, Ashlet et Turken (2011) ont d'ailleurs effectué une méta-analyse sur 66 études ayant utilisé une tâche de Go/No-Go ou de Stop-Signal et ont souligné le rôle important du pré-AMS et de l'insula pour la réussite de ces deux tâches.

En plus de l'insula antérieure, la seconde région significative chevauche aussi le cortex préfrontal ventrolatéral gauche. Tout comme le pré-AMS et l'insula, le CPVL gauche est aussi activé lors de l'inhibition (Nozari, Mirman et Thompson-Schill, 2016; Swick, Ashley et Turken, 2008; Swick et Chatham, 2014; Tamm, Menon et Reiss, 2002). La méta-analyse de Laird *et al.* (2005) sur la tâche de Stroop souligne d'ailleurs l'activation fréquente du CPVL gauche. L'étude à grand déploiement sur la tâche de Go/No-Go par Steel et ses collaborateurs (2013) a aussi permis de souligner une activation du CPVL. Finalement, Masson et ses collaborateurs (2014) ont aussi obtenu une activation significative du CPVL gauche dans leur tâche d'inhibition concernant une conception fréquente en électricité.

Plusieurs études semblent toutefois indiquer que l'inhibition serait davantage latéralisée dans le CPVL droit (Aron *et al.*, 2014; Cai, Ryali, Chen, Li et Menon, 2014;

Levy et Wagner, 2011). Néanmoins, l'activation du CPVL gauche peut s'expliquer par le type de stimuli utilisés pour cette étude et le fait que cette région soit activée lorsque l'inhibition sémantique est nécessaire. En effet, la tâche classique d'inhibition sémantique du Hayling¹⁵ active le CPVL gauche (Collette et al., 2001; Grosselin et al., 2010; Nathaniel-James, Fletcher et Frith, 1997). De plus, de nombreuses études sur l'encodage et la récupération d'informations en mémoire rapportent une forte latéralisation à gauche pour les stimuli verbaux ainsi qu'une forte latéralisation à droite pour les stimuli visuospatiaux (Fletcher *et al.*, 2002; Iidaka, Sadato, Yamada et Yonekura, 2000; Kelley *et al.*, 1998; Wagner *et al.*, 1998). Une activation bilatérale est aussi observée lorsque les stimuli visuels peuvent être facilement recodés sous forme verbale (Kelley *et al.*, 1998; Wig, Miller, Kingstone et Kelley, 2004). De même, la tâche de logique utilisée par Houdé *et al.* (2000) présente une latéralisation à gauche lors de l'analyse de l'activité cérébrale suivant un enseignement basé sur l'inhibition. Houdé et Borst (2015) associent d'ailleurs cette activation dans le CPVL gauche à la forte composante verbale de la tâche.

Finalement, la dernière région cérébrale significativement activée est le cortex préfrontal dorsolatéral gauche prévu par l'hypothèse de recherche. En effet, cette région cérébrale est couramment associée à l'inhibition et à la mémoire de travail (Miller et Cohen, 2001) ainsi qu'à la capacité à mettre en relation les informations provenant des différentes régions du cerveau (Blumenfeld, Parks, Yonelinas et Ranganath, 2011; Blumenfeld et Ranganath, 2007). Plusieurs tâches neuropsychologiques ont d'ailleurs souligné son activation lorsqu'il est nécessaire d'inhiber une réponse (Bush *et al.*, 1998; Laird *et al.*, 2005; Liddle *et al.*, 2001; MacDonald *et al.*, 2000; Menon *et al.*, 2001; Monchi *et al.*, 2001). Selon Heekeren *et al.* (2006), le CPDL gauche serait responsable de maintenir en mémoire l'information

¹⁵ Pour réussir la tâche du Hayling, les participants doivent compléter une phrase avec un mot qui n'a aucune relation sémantique avec le contexte de la phrase (ex : Les enfants adorent le gâteau au ... sable).

pertinente pour réaliser une tâche et pour permettre l'évaluation et la comparaison d'informations. L'activation du CPDL gauche lors de l'évaluation des énoncés incongruents n'est donc pas surprenante. En effet, les participants devaient maintenir en mémoire de travail les conceptions alternatives et scientifiques afin de pouvoir les comparer et sélectionner la bonne réponse.

Bien que les résultats obtenus soient conformes avec l'inhibition, l'activation du CCA, postulée par l'hypothèse de recherche, n'a pas été observée. L'absence d'activation du CCA n'est pas nécessairement surprenante puisque celui-ci était aussi absent des résultats de la comparaison *experts* > *novices* obtenus lors de l'étude de l'inhibition en mécanique (Brault Foisy *et al.*, 2015). L'explication fournie pour rendre compte de cette observation est que le CCA est aussi activé par les novices. Cette même explication est aussi plausible pour expliquer les résultats de cette recherche. Selon le modèle d'évaluation de la « valeur attendue de contrôle » (Shenhav *et al.*, 2013; Shenhav, Cohen et Botvinick, 2016), le CCA serait responsable de l'allocation du contrôle cognitif. Ainsi, cette région cérébrale pourrait être activée lors de l'évaluation des stimuli congruents et incongruents puisque les deux conditions nécessitent d'évaluer la quantité de contrôle cognitif à fournir pour résoudre la tâche. En effet, étant donné la grande variété de concepts de la tâche, les participants ne pouvaient pas automatiser leurs réponses et devaient donc évaluer chacun des stimuli même si ceux-ci ne requièrent pas d'inhibition. Puisque le CCA n'est pas responsable d'appliquer le contrôle cognitif, tâche associée à l'activation du CPVL, la présence d'inhibition lors des stimuli incongruents n'a pas nécessité un rôle plus important du CCA. Il est aussi possible que la puissance statistique de l'étude était tout simplement trop faible pour détecter cette faible différence dans l'activité du CCA.

Ainsi, l'ensemble des analyses sur les résultats permet une première interprétation préliminaire. En effet, considérant la différence significative d'exactitude et de temps réponse entre les stimuli congruents et incongruents ainsi que l'activation de régions

cérébrales pouvant être attribuée à l'inhibition uniquement lors de l'évaluation des stimuli incongruents, **les résultats de cette étude permettent de soutenir l'hypothèse de recherche sur la coexistence des conceptions en chimie ainsi que sur le rôle de l'inhibition dans la capacité à les surmonter, et ce, malgré une expertise importante dans ce domaine.** Une exploration des hypothèses alternatives s'avère toutefois nécessaire afin de garantir cette interprétation.

5.1.2.2 Hypothèse alternative

Une seconde hypothèse pour interpréter les résultats provient de l'étude de Nelson et ses collaborateurs (2007) qui ont aussi obtenu une activation significative du CPVL gauche et du CPDL gauche. Selon leur interprétation, la réussite de leur tâche serait attribuable à la mémoire de travail et la récupération d'informations sémantiques.

Le CPVL gauche est effectivement fréquemment attribué à la mémoire sémantique, c'est-à-dire la connaissance des faits, de la signification des mots et des propriétés des objets, même si son rôle précis dans ce processus cognitif est toujours débattu (Badre, Poldrack, Paré-Blagoev, Insler et Wagner, 2005; Badre et Wagner, 2007; Binder, Desai, Graves et Conant, 2009; McDermott, Petersen, Watson et Ojemann, 2003; Poldrack *et al.*, 1999; Snyder, Banich et Munakata, 2011; Thompson-Schill, D'Esposito, Aguirre et Farah, 1997; Wagner, Paré-Blagoev, Clark et Poldrack, 2001).

Cette région contribuerait aussi à la réussite des tâches nécessitant un contrôle des processus sémantiques (Badre et Wagner, 2007) bien que des chercheurs arguent encore sur la possibilité d'une division des fonctions selon les régions du CPVL gauche (Badre et Wagner, 2007; Thompson-Schill et Botvinick, 2006). Selon Badre et Wagner (2007), la partie antérieure du CPVL gauche (BA 47, pars orbitalis) serait responsable du contrôle de l'accès aux représentations conceptuelles alors que la partie médiane (BA 45, pars triangularis) s'activerait après la récupération afin de résoudre la compétition entre les représentations actives. En contrepartie, Thompson-Schill et Botvinick (2006) et Nozaria, Mirman et Thompson-Schill (2016) avancent que ces

deux processus peuvent très bien être intégrés dans un seul modèle où la récupération des représentations sémantiques implique nécessairement une sélection entre plusieurs représentations.

Toutefois, nous croyons que l'hypothèse de l'inhibition demeure la meilleure explication pour expliquer nos résultats. Étant donné la nature de notre tâche, il est impossible d'identifier avec précision l'activation du CPVL gauche selon la séparation proposée par Badre et Wagner (2007). Par contre, cette activation concorde avec la proposition de Thompson-Schill et Botvinick (2006) et de Nozaria, Mirman et Thompson-Schill (2016) dans laquelle la sélection entre deux représentations en compétition est intégrée au processus de récupération. Cette sélection entre les deux représentations peut effectivement être associée à une forme d'inhibition sémantique. De plus, contrairement à Nelson *et al.* (2007), les résultats de cette étude ont permis d'obtenir le pré-AMS qui contribue à la planification du mouvement et à l'inhibition motrice. L'activation de cette région indique que les participants ont dû modifier leurs mouvements pour inhiber leurs réponses intuitives. Le travail cognitif effectué par les participants dépassent donc la récupération d'informations sémantiques.

Par conséquent, nous croyons que l'hypothèse sur la coexistence des conceptions et sur le rôle de l'inhibition demeure recevable. Les experts en chimie ont donc effectivement besoin d'inhiber leurs conceptions alternatives lorsque ceux-ci doivent répondre à des questions contre-intuitives de nature conceptuelle.

5.2 Limites de l'étude

Les limites de l'étude doivent ensuite être analysées afin de déterminer leur influence sur la conclusion de cette recherche. Tout d'abord, certaines raisons ayant potentiellement influencé la puissance statistique de l'étude seront discutées. Ensuite, des recommandations générales seront formulées afin de corriger certaines lacunes et orienter les futures recherches sur le rôle de l'inhibition dans l'apprentissage de la chimie.

Un des facteurs pouvant expliquer la difficulté à obtenir un seuil de significativité élevé est la potentielle faiblesse de l'effet mesuré. En effet, l'expertise des participants peut se traduire par une automatisation du recours au concept scientifique contribuant ainsi à diminuer l'interférence de la conception alternative. Il leur est donc plus facile de les inhiber et l'activité cérébrale dans les régions associées à l'inhibition en est ainsi diminuée. Cette tendance peut aussi être associée au développement des régions associées à l'inhibition qui diminue le « coût » cognitif relié à l'inhibition (Best et Miller, 2010; Borst, Poirel, Pineau, Cassotti et Houdé, 2013).

D'autres considérations méthodologiques ont possiblement influencé la puissance statistique de l'étude. En premier lieu, le fait de conserver uniquement les stimuli réussis réduit le nombre d'énoncés analysés. Un plus grand nombre de participants, une tâche plus simple ou un questionnaire diagnostique pour sélectionner les participants sont de simples suggestions pouvant être appliquées à une prochaine étude similaire. En second lieu, la structure de la tâche peut aussi avoir une influence sur les résultats obtenus. En effet, les stimuli incongruents étaient très semblables aux stimuli congruents, puisque plusieurs facteurs ont été contrôlés lors de leur élaboration. Ainsi, cela contribue à réduire l'écart entre les conditions et diminue la facilité à détecter un effet significatif. De plus, l'étude d'une grande variété de conceptions alternatives peut aussi avoir contribué à augmenter le bruit dans les données.

Finalement, l'absence d'interventions pédagogiques et l'expertise des participants limitent la portée des recommandations pédagogiques de cette étude. Il est en effet impossible de garantir que l'inhibition soit nécessaire au début d'un apprentissage. Une certaine expertise est peut-être nécessaire avant de parvenir à inhiber les conceptions alternatives. Pour contrer cette limite, une future étude pourrait comparer l'activité cérébrale avant et après l'apprentissage d'un concept afin d'obtenir une mesure plus adéquate de l'activité cérébrale pendant le processus de changement conceptuel. De même, une comparaison avec un groupe de novices en chimie et l'ajout de stimuli

neutres adaptés aux contraintes de la tâche pourraient contribuer à peaufiner l'interprétation des résultats et aider à améliorer notre compréhension du changement conceptuel en chimie. En effet, il serait alors possible de mieux observer l'évolution de l'activité cérébrale associée au développement de l'expertise en chimie et de faciliter l'orientation des interventions pédagogiques.

5.3 Retombées de l'étude

En résumé, les résultats de cette étude appuient les conclusions des études sur l'inhibition et le changement conceptuel en sciences (Brault Foisy *et al.*, 2015; Masson *et al.*, 2014; Potvin *et al.*, 2014; Shtulman et Harrington, 2015) ainsi que les modèles de changement conceptuel basés sur la coexistence des conceptions (Mortimer, 1995; Ohlsson, 2009; Potvin, 2013, 2017; Solomon, 1983). De plus, elle renforce aussi l'hypothèse des styles de raisonnement (Evans, 2008; Frankish et Evans, 2009; Kahneman, 2011). Concrètement, cela signifie que, pour chaque problème, deux réseaux de neurones peuvent coexister dans le cerveau des experts en chimie : un premier qui renvoie à la conception alternative et un second associé au concept scientifique (Brault Foisy *et al.*, 2015). Ainsi, l'apprentissage d'un concept en chimie n'entraîne pas la suppression ou la modification de la conception alternative, mais permet plutôt la création d'un réseau de neurones supplémentaire. Ensuite, le développement de l'expertise contribue à identifier les contextes susceptibles d'entraîner l'activation de la conception alternative et à permettre le recours au contrôle inhibiteur. Cette nouvelle façon de concevoir l'apprentissage des concepts entraîne ainsi plusieurs conséquences sur la recherche scientifique et l'enseignement des sciences.

5.3.1 Retombées sur les recherches sur le changement conceptuel

Comme discuté dans les chapitres précédents, les modèles de changement conceptuel possèdent des visions parfois différentes sur l'avenir des conceptions alternatives. Pour certains modèles, un changement conceptuel réussi entraîne le remplacement ou la

transformation de la conception alternative. Pour d'autres, il s'agit plutôt d'une compétition entre la conception alternative et le concept scientifique. Ainsi, plusieurs de ces modèles devront être repensés si l'hypothèse de l'inhibition et de la coexistence des conceptions s'avère aussi essentielle pour apprendre la chimie que les résultats de cette étude le laissent entendre. Par exemple, selon Masson et ses collaborateurs (2014), le modèle de Vosniadou (1994) devrait considérer la coexistence entre les présuppositions épistémologiques et ontologiques naïves et scientifiques. De même, le modèle des catégories ontologiques de Chi (1994) peut inclure l'inhibition en considérant la nécessité de bloquer le recours aux catégorisations intuitives au profit d'une catégorisation scientifique. Des recherches supplémentaires seront donc nécessaires afin de déterminer la meilleure façon d'harmoniser ces modèles avec la coexistence des conceptions sans négliger les dimensions sociales, affectives et motivationnelles (Pintrich, Marx et Boyle, 1993; Tyson *et al.*, 1997).

D'un autre côté, les modèles de coexistence des conceptions demeurent cohérents avec les résultats de cette recherche (Bélanger, 2008; Mortimer, 1995; Mortimer et El-Hani, 2014; Ohlsson, 2009; Potvin, 2013, 2017; Solomon, 1983, 1984). En effet, la compétition entre la conception alternative et scientifique est centrale à cette catégorie de modèles. D'autres modèles, comme ceux des p-prims de diSessa (1993) ou des intuitions fondamentales de Brown (1993), pourraient être considérés compatibles avec la coexistence des conceptions même si ces auteurs ne le mentionnent pas explicitement.

Cependant, malgré ces multiples propositions, le modèle de la prévalence conceptuelle (Potvin, 2013, 2017) est l'un des seuls, avec celui des règles intuitives (Babai et al., 2015; Babai et al., 2014; Stavy et Babai, 2010; Stavy et Tirosh, 2000), à inclure explicitement l'inhibition. Il serait néanmoins pertinent d'étudier comment les autres modèles peuvent s'harmoniser avec l'inhibition. D'ailleurs, le modèle de prévalence conceptuelle ne se prononce pas sur la meilleure approche pour favoriser

l'apprentissage du concept scientifique. Ainsi, de futures études pourraient s'intéresser à identifier les meilleurs modèles pour apprendre les différents concepts lorsque l'idée de la prévalence conceptuelle est aussi considérée. Les nombreuses propositions provenant des recherches en didactique de la chimie peuvent en outre s'avérer très fécondes pour développer une approche adaptée aux particularités de cette discipline (Harrison et Treagust, 2000; Taber, 2001b, 2014; Talanquer, 2006, 2015). Combinés avec l'ensemble des modèles déjà présents dans la littérature sur le changement conceptuel, ces recherches constituent donc des points de départ intéressants pour inclure l'inhibition et pour contribuer à l'élaboration de nouvelles stratégies d'enseignement de la chimie.

5.3.2 Retombées sur l'enseignement des sciences

Une fonction importante de l'inhibition dans l'apprentissage permet en effet de considérer autrement l'enseignement des sciences. Tout d'abord, il est important de considérer que le fait de fournir une bonne réponse ne constitue pas une preuve d'un apprentissage définitif. Dans plusieurs situations, il s'agit plutôt d'un premier pas dans un processus marqué par plusieurs allers-retours entre la conception alternative et le concept scientifique.

Une façon d'illustrer ce phénomène consiste à comparer les différents réseaux de neurones aux sentiers d'une forêt (Potvin, 2011). À l'image d'un sentier balisé et dégagé, les neurones associés à la conception alternative sont fréquemment utilisés et leur activation devient alors plus facile et automatisée. À l'opposé, l'apprentissage entraîne la création d'un « nouveau sentier » pour les neurones associés au concept scientifique. Ce nouveau sentier moins familier doit pourtant rivaliser avec le sentier défriché de la conception alternative. Ce n'est qu'en activant plusieurs fois les neurones du concept scientifique que ceux-ci pourront devenir aussi « attrayants » pour les élèves.

De plus, tel un sentier abandonné qui demeure toujours praticable, les neurones de la conception alternative restent toujours activables après l'apprentissage d'un nouveau concept. Il n'est donc pas surprenant de constater un retour à la conception alternative dans les réponses des élèves. Ainsi, les erreurs dans le raisonnement des élèves n'auront pas le même statut pour un enseignant qui adopte des stratégies d'enseignement basées sur l'inhibition. Au lieu d'attribuer leurs erreurs à une mauvaise compréhension, il devient possible de les associer à l'activation d'une conception alternative qui n'a pas été inhibée. L'enseignant doit alors guider les élèves pour qu'ils puissent reconnaître les contextes où le recours à la conception alternative est plus probable.

Quelques études se sont d'ailleurs intéressées aux différentes stratégies pouvant faciliter l'enseignement de l'inhibition. Houdé et ses collaborateurs (Houdé *et al.*, 2001; Houdé *et al.*, 2000) ont utilisé une stratégie basée sur des alertes émotives (par exemple : « Attention! Il y a un piège dans cette question et tu dois y résister ») et sur des périodes d'entraînement à l'identification des pièges. Cette stratégie a eu pour effet d'améliorer la performance des participants à résoudre une tâche contre-intuitive en logique. De plus, ils ont observé un déplacement de l'activité cérébrale vers les régions associées à l'inhibition. Babai et son équipe (Babai *et al.*, 2015; Babai *et al.*, 2014; Stavy et Babai, 2010) ont aussi utilisé avec succès la stratégie d'avertir les élèves de la présence d'un piège dans leurs tâches contre-intuitives en mathématiques. L'apprentissage de l'inhibition semble donc contribuer à améliorer la capacité des élèves à surmonter les interférences lors de la réalisation de tâches contre-intuitives.

Le modèle de la prévalence conceptuelle incorpore d'ailleurs cette idée d'alertes émotives dans une approche du changement conceptuel basée sur les recherches en neuroéducation (Potvin, 2013, 2017). Tout d'abord, l'enseignant voulant garantir la prévalence du concept scientifique doit s'assurer que celui-ci est bien compris par ses élèves. Ensuite, l'enseignant peut introduire les alertes émotives pour avertir les élèves des contextes où ils sont enclins à faire des erreurs. Finalement, l'enseignant doit

constamment renforcer le concept scientifique afin de garantir la durabilité du changement conceptuel. L'utilisation du conflit cognitif peut aussi s'avérer utile pour aider à identifier les contextes problématiques, à condition que les élèves soient déjà aptes à utiliser le concept scientifique (Potvin *et al.*, 2015). Ainsi, certains élèves pourraient bénéficier d'un conflit cognitif seulement si celui-ci survient plus tard dans la séquence d'enseignement.

Potvin (2017) poursuit les recommandations pédagogiques en mentionnant plusieurs conséquences à considérer la coexistence des conceptions. En plus de réaffirmer la nécessité de revoir la façon de combattre les conceptions alternatives et d'utiliser le conflit cognitif, il souligne aussi l'importance d'être attentif au fait qu'une attaque contre une conception alternative peut être interprétée comme une attaque personnelle par les élèves. Il mentionne également la nécessité de viser la durabilité du « changement » conceptuel en commençant notamment l'enseignement de la science le plus rapidement possible. Des changements dans la progression des apprentissages et le curriculum des cours de chimie pourraient ainsi être nécessaires pour respecter cette contrainte et viser la prévalence des concepts scientifiques.

Afin d'explicitier l'idée de la coexistence des conceptions, Potvin propose aussi une analogie avec les concepts de *phénotype* et de *génotype* où « un changement dans le phénotype [verbalisations, performances, réponses] ne signifie pas nécessairement qu'un changement substantiel a eu lieu dans le génotype [représentations, conceptions, p-prims, règles intuitives, etc.] » (Potvin, 2017, p. 63, traduction libre). Il affirme aussi, selon cette analogie avec la biologie, que le changement conceptuel serait un processus *épigénétique*, puisque « le résultat apparent (phénotype) ne dépend pas uniquement de la disponibilité des conceptions (génotype), mais aussi (et surtout) de leur potentielle expression (ou leur absence d'expression) [...] » (Potvin, 2017, p. 64, traduction libre). Cette analogie encourage ainsi à concevoir autrement les recherches sur les conceptions alternatives et le changement conceptuel. De même, elle rappelle aux enseignants qu'il

est essentiel de considérer le contexte des réponses pour avoir une idée précise du raisonnement des élèves et des raisons pouvant expliquer les mauvaises réponses.

L'ensemble de ces recommandations constitue un premier pas vers l'intégration de l'inhibition dans l'enseignement. Il nous apparaît toutefois primordial de continuer à étudier cette nouvelle approche afin de déterminer les stratégies qui permettront aux élèves de mieux résister à l'interférence créée par leurs conceptions alternatives.

CHAPITRE VI

CONCLUSION

Les difficultés causées par les conceptions alternatives des élèves ont occupé une place importante dans les recherches en sciences (Liu, 2001; Sirhan, 2007; Wandersee *et al.*, 1994). Leur étude a même entraîné la création d'un champ de recherche visant à modéliser l'évolution des conceptions alternatives des élèves vers les concepts scientifiques à apprendre. Malgré cet intérêt marqué, les processus responsables du changement conceptuel demeurent incompris et plusieurs enjeux théoriques sont encore débattus (diSessa, 2006, 2008; Rusanen, 2014). L'un de ces enjeux concerne l'avenir des conceptions alternatives après le changement conceptuel, puisque certains chercheurs affirment qu'elles coexistent avec les concepts scientifiques dans le cerveau des apprenants. En effet, des résultats récents en IRMf semblent indiquer que l'inhibition contribue à l'expertise en physique puisqu'il est nécessaire de surmonter l'interférence causée par les conceptions alternatives (Brault Foisy *et al.*, 2015; Masson *et al.*, 2014).

L'objectif principal de cette recherche était de poursuivre l'étude du rôle de l'inhibition dans le changement conceptuel dans le contexte de l'apprentissage de la chimie. Pour y parvenir, des enseignants de chimie de niveau collégial et universitaire ont participé à une séance d'IRMf pendant laquelle ils devaient répondre à des énoncés qui demandaient de surmonter des conceptions alternatives. L'analyse de l'activité cérébrale pendant l'évaluation de ces énoncés cherchait ainsi à obtenir une activation significative dans les régions cérébrales associées à l'inhibition.

Les résultats obtenus ont permis de révéler une activité cérébrale plus significative dans la partie antérieure de l'aire motrice supplémentaire (pré-AMS), dans le cortex préfrontal ventrolatéral gauche et l'insula antérieure gauche ainsi que dans le cortex préfrontal dorsolatéral gauche. Le rôle de ces trois régions dans l'inhibition vient ainsi corroborer l'hypothèse de recherche sur la coexistence des conceptions et sur le rôle de cette fonction exécutive dans l'apprentissage de la chimie (Obeso *et al.*, 2013; Swick *et al.*, 2008). Cette conclusion est d'ailleurs appuyée par l'analyse des résultats comportementaux qui a permis d'obtenir une différence significative lors de la comparaison de l'exactitude et des temps de réponse entre les énoncés congruents et incongruents. Ces résultats répliquent aussi les nombreuses études qui ont conclu à la coexistence des conceptions en sciences (Babai et Amsterdamer, 2008; Babai, Sekal, *et al.*, 2010; Brault Foisy *et al.*, 2015; Goldberg et Thompson-Schill, 2009; Kelemen et Rosset, 2009; Kelemen *et al.*, 2012; Lombrozo *et al.*, 2007; Masson *et al.*, 2014; Potvin *et al.*, 2014; Shtulman et Harrington, 2015; Shtulman et Valcarcel, 2012; Zaitchik et Solomon, 2008).

Plusieurs conséquences sur les recherches concernant le changement conceptuel découlent de la conclusion de cette étude. Tout d'abord, les modèles de changement conceptuel pourront être réanalysés afin de déterminer comment ils peuvent inclure la coexistence des conceptions. Les différents modèles proposés par les chercheurs en didactique de la chimie constituent d'ailleurs des pistes de réflexion pertinentes (Harrison et Treagust, 2000; Taber, 2001b, 2014; Talanquer, 2006, 2015). Ces modifications pourront ensuite être appliquées en contexte scolaire afin de connaître leur efficacité, notamment lorsque les dimensions affectives et motivationnelles sont aussi considérées.

La coexistence des conceptions exige aussi une approche légèrement différente de l'enseignement des sciences. En effet, l'enseignant ne doit pas considérer que les erreurs des élèves soient nécessairement la preuve d'une mauvaise compréhension ou

que l'apprentissage est terminé dès qu'une réponse exacte est obtenue. Son enseignement doit plutôt viser à garantir la durabilité du concept scientifique en aidant notamment les élèves à identifier les contextes susceptibles d'entraîner le recours à une conception alternative (Potvin, 2013, 2017). Un apprentissage à inhiber pourrait d'ailleurs s'avérer efficace et contribuer à augmenter la vigilance des élèves (Houdé *et al.*, 2001; Houdé *et al.*, 2000). Un réarrangement du curriculum et de la progression des apprentissages dans les cours de chimie pourrait aussi contribuer à garantir l'acquisition précoce de concepts scientifiques importants qui pourront ainsi obtenir plus d'opportunités d'améliorer leur prévalence.

En dépit des nombreuses précautions prises lors de l'élaboration de cette étude, quelques limites, mentionnées précédemment à la section 5.2, méritent d'être rappelées ici. En premier lieu, la puissance statistique de l'étude n'est peut-être pas assez élevée à cause de la potentielle faiblesse de l'effet mesuré. Cette faiblesse est probablement causée par différents facteurs, notamment par le fait que seuls les énoncés réussis ont été conservés et que la variété des concepts scientifiques abordés dans la tâche introduit une variance supplémentaire dans les données. De plus, la grande expertise des participants a peut-être mené à une certaine « automatisation » de l'inhibition. En second lieu, il serait aussi intéressant de mesurer l'activité cérébrale après une intervention pédagogique ou à plusieurs moments pendant le cheminement scolaire afin d'avoir une mesure plus précise des modifications cérébrales entraînées par le changement conceptuel. Finalement, les recommandations pédagogiques proposées dans ce mémoire demeurent préliminaires et des études plus approfondies devront valider leur efficacité. D'autres suggestions pourraient évidemment émaner de ces recherches et contribuer à mieux outiller les enseignants et les élèves dans cette course sans fin vers une meilleure compréhension de la science.

APPENDICE A

FORMULAIRE DE CONSENTEMENT

Centre intégré
universitaire de santé
et de services sociaux
du Centre-Sud-
de-l'île-de-Montréal

Québec



Comité d'éthique de la recherche vieillissement-neuroimagerie

Formulaire d'information et de consentement

Titre du projet de recherche :	Mécanismes cérébraux liés à l'expertise scientifique en chimie.
Chercheur responsable du projet de recherche :	Steve Masson, Professeur, Université du Québec à Montréal.
Organisme subventionnaire :	Conseil de recherches en sciences humaines du Canada (CRSH)

Préambule

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

Nature et objectifs du projet de recherche

Ce projet de recherche vise à mieux comprendre les mécanismes cérébraux liés à l'expertise scientifique en chimie. Plus précisément, l'objectif est d'identifier quelles sont les régions cérébrales activées par des scientifiques lorsqu'ils doivent répondre à des questions portant sur les sciences. Pour la réalisation de ce projet de recherche, nous comptons recruter 24 scientifiques professionnels en chimie.

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

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

L'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle permet, quant à elle, de voir les zones du cerveau qui deviennent actives lorsqu'on demande à une personne d'effectuer une tâche. En effet, lorsque la personne effectue la tâche demandée, il y a une augmentation de

l'arrivée de sang dans la partie du cerveau qui contrôle cette activité. L'arrivée du sang provoque un changement dans le signal émis par le cerveau et cette modification de signal peut être détectée par l'appareil.

Pour la réalisation de ce projet de recherche, aucune substance ne sera injectée. Vous serez allongé sur un matelas qui sera lentement glissé dans un grand tube. Le tube est ouvert aux deux extrémités. Un système d'interphone vous permet de communiquer avec le technologue au besoin. Pour votre confort, nous vous demanderons 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 de demeurer immobile. Pour ce faire, un coussinet sera placé autour de votre tête afin d'assurer votre immobilité.

Déroulement du projet de recherche

Ce projet de recherche se déroulera à l'Unité de neuroimagerie fonctionnelle (UNF) du Centre de recherche de l'Institut universitaire de gériatrie de Montréal.

Votre participation à ce projet de recherche consistera à passer une imagerie par résonance magnétique. Lors de l'imagerie, nous vous demanderons d'effectuer certaines tâches qui nous permettront de capter les images de votre cerveau pendant que vous effectuerez ces tâches. Deux tâches parmi les trois que vous devrez accomplir solliciteront votre expertise en chimie. L'une d'elle consistera à déterminer, en appuyant sur l'un ou l'autre de deux boutons, si les énoncés scientifiques présentés sur un écran sont vrais ou faux. L'autre consistera à sélectionner la réponse qui, parmi un choix de deux réponses, s'avère appropriée au regard de la question scientifique posée. La troisième tâche sert de point de comparaison et consiste à identifier le nombre de mots présenté à l'écran.

La durée totale que prendra la réalisation de ces tâches sera d'environ 1 heure. La durée totale de votre participation à ce projet de recherche sera de 2 heures, ce qui inclut (1) les étapes préparatoires à l'imagerie par résonance magnétique (1 heure) et (2) la collecte des images du fonctionnement cerveau (1 heure, incluant le temps d'attente).

Avantages associés au projet de recherche

Vous ne retirerez aucun bénéfice personnel de votre participation à ce projet de recherche. Cependant, les connaissances acquises permettront de contribuer à une meilleure compréhension des mécanismes cérébraux liés à l'expertise scientifique et à une meilleure compréhension des concepts scientifiques, ce qui pourrait, à terme, mener à des pistes d'intervention susceptibles d'aider les élèves à apprendre les sciences.

Inconvénients associés au projet de recherche

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

Risques associés au projet de recherche

Selon les connaissances actuelles, votre participation à une imagerie par résonance magnétique réalisée en recherche ne vous fera courir aucun risque, sur le plan médical, si vous ne présentez aucune contre-indication.

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

Risques associés à la grossesse

La participation à ce projet de recherche peut comporter des risques, connus ou non, pour les femmes enceintes, les enfants à naître ou encore les nourrissons allaités au sein. C'est pourquoi les femmes enceintes ou qui allaitent ne peuvent participer à ce projet.

Les femmes susceptibles de devenir enceintes devront se prêter à un test de grossesse avant la réalisation de l'imagerie par résonance magnétique et elles ne pourront participer à ce projet que si le résultat du test de grossesse est négatif.

Découverte fortuite

Les images acquises lors de l'imagerie par résonance magnétique réalisée en recherche à l'Unité de neuroimagerie fonctionnelle du Centre de recherche de l'Institut universitaire de gériatrie de Montréal ne font pas l'objet d'un examen médical systématique par un médecin. Cependant, elles peuvent mettre en évidence des problèmes jusque-là ignorés, c'est ce que l'on appelle une découverte fortuite. C'est pourquoi, en présence d'une particularité, le chercheur responsable du projet de recherche vous appellera.

Participation volontaire et possibilité de retrait

Votre participation à ce projet de recherche est volontaire. Vous êtes donc libre de refuser d'y participer. Vous pouvez également vous retirer de ce projet à n'importe quel moment, sans avoir à donner de raisons, en faisant connaître votre décision au chercheur responsable de ce projet de recherche ou à l'un des membres de son personnel de recherche.

Le chercheur responsable du projet de recherche, le Comité d'éthique de la recherche vieillissement-neuroimagerie ou le Conseil de recherches en sciences humaines du Canada (CRSH) peuvent mettre fin à votre participation, sans votre consentement, s'il existe des raisons administratives d'abandonner le projet.

Si vous vous retirez ou êtes retiré du projet, l'information déjà obtenue dans le cadre de ce projet sera conservée aussi longtemps que nécessaire pour se conformer aux exigences réglementaires.

Toute nouvelle connaissance acquise durant le déroulement du projet qui pourrait affecter votre décision de continuer d'y participer vous sera communiquée sans délai verbalement et par écrit.

Confidentialité

Durant votre participation à ce projet, le chercheur responsable de ce projet de recherche ainsi que les membres de son personnel de recherche recueilleront, dans un dossier de recherche, les renseignements vous concernant. Seuls les renseignements nécessaires pour

répondre aux objectifs scientifiques de ce projet seront recueillis.

Ces renseignements peuvent comprendre les informations concernant votre nom, votre sexe, votre date de naissance et vos résultats aux questionnaires de compréhension en science et de compétence linguistique.

Tous les renseignements recueillis demeureront confidentiels dans les limites prévues par la loi. Afin de préserver votre identité et la confidentialité des 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 de ce projet de recherche.

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

Les données de recherche pourront être publiées dans des revues spécialisées ou faire l'objet de discussions scientifiques, mais il ne sera pas possible de vous identifier. Également, les données de recherche pourraient servir pour d'autres analyses de données reliées au projet ou pour l'élaboration de projets de recherches futurs. Par ailleurs, vos renseignements personnels, tels que votre nom ou vos coordonnées, seront conservés pendant 5 ans après la fin du projet par le chercheur responsable de ce projet de recherche et seront détruits par la suite.

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

À des fins de protection, notamment afin de pouvoir communiquer avec vous rapidement, 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 à part maintenu par le chercheur responsable de ce projet de recherche.

En conformité avec la loi sur l'accès à l'information, vous avez le droit de consulter votre dossier de recherche pour vérifier les renseignements recueillis et les faire rectifier au besoin, et ce, aussi longtemps que le chercheur responsable de ce projet de recherche détient ces informations.

Études ultérieures

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

Ces projets de recherche seront évalués et approuvés par le Comité d'éthique de la recherche vieillissement-neuroimagerie avant leur réalisation. Vos données de recherche seront conservées de façon sécuritaire dans la Banque de données du Centre de recherche de l'IUGM, et ce, conformément à la politique de gestion de la Banque de données du Centre de recherche de l'IUGM. Afin de préserver votre identité et la confidentialité de vos données de recherche, vous ne serez identifié que par un numéro de code.

Vos données de recherche seront conservées aussi longtemps qu'elles peuvent avoir une utilité pour l'avancement des connaissances scientifiques. Lorsqu'elles n'auront plus d'utilité,

vos données de recherche seront détruites. Par ailleurs, notez qu'en tout temps, vous pouvez demander la destruction de vos données de recherche en vous adressant au chercheur responsable de ce projet de recherche.

Acceptez-vous que vos données de recherche soient utilisées à ces conditions? ☐ Oui

☐ Non

Participation à des études ultérieures

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

Financement du projet de recherche

Le chercheur responsable du projet de recherche a reçu un financement du Centre de recherches en sciences humaines du Canada (CRSH) pour mener à bien ce projet de recherche.

Compensation

I. Participants provenant de Montréal et les environs (moins de 100 km de Montréal).

Un montant de 20 dollars est accordé pour la participation à l'étude et un autre montant de 20 dollars est accordé pour couvrir les frais de déplacement. Vous recevrez également une image numérique de votre cerveau.

II. Participants éloignés de Montréal (plus de 100 km de Montréal).

Un montant de 20 dollars est accordé pour la participation à l'étude. Une compensation monétaire pour les frais de déplacement de 0,40\$/km est également offerte. Si votre participation à l'étude vous oblige à dormir à Montréal, vos frais d'hébergement seront remboursés (jusqu'à concurrence de 145\$ pour une nuit).

Indemnisation en cas de préjudice et droits du sujet de recherche

Si vous deviez subir quelque préjudice que ce soit dû à votre participation au projet de recherche, vous recevrez tous les soins et services requis par votre état de santé, sans frais de votre part.

En acceptant de participer à ce projet de recherche, vous ne renoncez à aucun de vos droits ni ne libérez le chercheur responsable de ce projet de recherche, le Conseil de recherches en sciences humaines du Canada (CRSH) et l'établissement de leur responsabilité civile et professionnelle.

Procédures en cas d'urgence médicale

Veuillez 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 seront dispensés

par le personnel en place et des dispositions seront prises afin de vous transférer, si nécessaire, aux urgences d'un hôpital avoisinant.

Identification des personnes-ressources

Si vous avez des questions concernant le projet de recherche ou si vous éprouvez un problème que vous croyez relié à votre participation au projet de recherche, vous pouvez communiquer avec le chercheur responsable du projet de recherche, Steve Masson, au numéro suivant : 514.987.3000, poste 5502.

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

Surveillance des aspects éthiques du projet de recherche

Le Comité d'éthique de la recherche vieillissement-neuroimagerie a approuvé ce projet de recherche et en assure le suivi. De plus, il approuvera au préalable toute révision et toute modification apportée au protocole de recherche et au formulaire d'information et de consentement. Pour toute information, vous pouvez joindre le secrétariat du Comité, par téléphone au 514.340.2800, poste 3250 ou par courriel à l'adresse suivante: karima.bekhiti.iugm@ssss.gouv.qc.ca

Consentement

Titre du projet de Mécanismes cérébraux liés à l'expertise scientifique en chimie
recherche :

1. Consentement du participant

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

Après réflexion, je consens à participer à ce projet de recherche aux conditions qui y sont énoncées.

Signature du participant

Date

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

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

Signature de la personne qui obtient le consentement

Date

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

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

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

Signature du chercheur responsable du projet de recherche

Date

APPENDICE B

FORMULAIRE DE DÉPISTAGE



Nom		Prénom	
Date de naissance (aaaa/mm/jj):		Sexe :	F M
Grandeur :	_____ cm	Poids :	_____ kg
Chercheur (ou) Projet (ou) No éthique :			
Afin d'assurer la sécurité de toute personne accédant aux locaux de l'UNF, il est très important que ce questionnaire soit complété correctement. Toute information contenue dans ce document est traitée en toute confidentialité.			
1. Avez-vous déjà subi une opération ?			
	Non	Oui	Si oui, précisez le type de chirurgie et la date
Tête			
Thorax ou cœur			
Abdomen, pelvis			
Bras, mains			
Jambes, pieds			
Colonne vertébrale			
Yeux			
Autres			
2. Portez-vous ?			
	Non	Oui	
Stimulateur cardiaque ? Électrodes épicaudiques ?			
Clip pour anévrisme cérébral, Stent ?			
Filtre ou cathéter dans un vaisseau sanguin ?			

Nom	Prénom	
Prothèse valvulaire cardiaque ?		
Prothèse cochléaire ? Prothèse auditive ?		
Neurostimulateur, stimulateur électronique pour les os ?		
Corps étrangers métalliques (ex: balles, fragments d'obus, éclats métalliques) ?		
Pompe à insuline implantée ?		
Prothèse orthopédique (ex: clou, vis, plaque) ?		
Maquillage permanent ou tatouage(s) ?		
Perçage(s) ?		
Implant(s) magnétique(s) ou non magnétique(s) ?		
Diaphragme, stérilet ?		
Prothèse dentaire, couronne ou appareil orthodontique ?		
Implant(s) ou prothèse(s) oculaire(s) ?		
Système de distribution transdermique (ex: timbre de nitroglycérine) ?		
Autres:		

	Non	Oui
3. Êtes-vous enceinte ou croyez-vous l'être ?		
4. Êtes-vous claustrophobe ?		
5. Avez-vous déjà été blessé(e) par un morceau de métal (ex: Accident de voiture, accident du travail, blessure de guerre, etc.) ? Si oui, veuillez préciser:		
6. Avez-vous subi un examen par résonance magnétique ?		
7. Avez-vous déjà été:		
Machiniste ?		
Soudeur ?		
Opérateur de machinerie lourde ?		
Travailleur de métal ?		
8. Souffrez-vous de problème respiratoire ou moteur ?		

Nom	Prénom
On m'a expliqué les procédures à suivre lors d'une session d'IRM. On m'a informé des mesures de sécurité à appliquer et on a répondu à toutes mes questions. Je certifie que les renseignements ci-dessus sont exacts au meilleur de mes connaissances et consens à participer à une étude d'IRM.	

PARTICIPANT:		
Lettres moulées	Signature	Date

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

APPENDICE C

INVITATION ENVOYÉE AUX PARTICIPANTS



Université du Québec
à Montréal



Objet : Participation à un projet de recherche en neuroimagerie portant sur l'expertise scientifique en chimie

Nous vous invitons à participer à un projet de recherche en neuroimagerie. Ce projet vise à mieux comprendre les mécanismes cérébraux liés à l'expertise scientifique en chimie.

Votre participation à ce projet de recherche consistera à répondre à des questions liées aux sciences dans un appareil d'imagerie par résonance magnétique, ce qui permettra de mesurer votre activité cérébrale.

Pour être admissible à participer à ce projet, vous devez être droitier, être âgé de moins de 65 ans, occuper depuis au moins 5 ans un poste de professeur en chimie au collégial ou à l'université, et comprendre avec facilité des textes rédigés en langue française.

Ce projet de recherche sera réalisé au Centre de recherche de l'IUGM au 4565 chemin Queen-Mary, Montréal, près du métro Snowdon.

C'est avec plaisir que nous vous offrons une compensation monétaire pour vos frais de déplacement et d'hébergement.

La durée totale de votre participation, incluant le temps d'attente, sera d'au plus deux heures.

Étant donné le nombre restreint d'experts en chimie au Québec, la mise à contribution de votre expertise est essentielle à la réalisation de ce projet de recherche.

Merci d'avance pour votre soutien.
Steve Masson Ph.D., Éducation
Professeur en neuroéducation
Centre de recherche en neurosciences de l'UQAM
masson.steve@uqam.ca
514.987.3000, poste 5502

Annonce publicitaire approuvée le 30 avril 2016 par le Comité d'éthique de la recherche vieillissement-neuroimagerie, dans le cadre du projet CMER RNQ 13-14-023.

APPENDICE D

ÉNONCÉS DE LA TÂCHE COGNITIVE

Consignes aux participants :

- Déterminez si l'énoncé est scientifiquement vrai ou faux.
- Répondez le plus rapidement et le mieux possible.
- Vous avez 10 secondes pour répondre à chacun des vrai ou faux.
- Boutons
 - Vrai = Index de la main droite
 - Faux = Majeur de la main droite

Explications du tableau :

Colonne « Numéro » : Numéro des énoncés. Le premier énoncé est l'énoncé congruent tandis que l'énoncé prime « ' » correspond l'énoncé incongruent

Colonne « Session » : Numéro de la session dans laquelle l'énoncé était présenté. La lettre « M » signifie que l'énoncé faisait partie d'un bloc mixte qui n'a pas été analysé.

Colonne « Énoncé » : Énoncés présentés aux participants

Colonne « Réponse » : Réponses exactes des énoncés.

- V = Énoncé scientifiquement vrai
- F = Énoncé scientifiquement faux

Colonne « Conception alternative » : Conceptions alternatives ayant servi à formuler les énoncés incongruents ainsi que les références qui les appuient.

Tableau D.1 Liste des énoncés de la tâche cognitive

Numéro	Session	Énoncé	Réponse	Conception alternative
1	2	H ₂ SO ₄ est un acide plus fort que HCN.	V	La force d'un l'acide dépend du nombre de H (Graulich, 2015).
1'	2	H ₃ PO ₄ est un acide plus fort que HNO ₃ .	F	
2	2	Une neutralisation acidobasique peut former une solution neutre.	V	Le terme neutralisation suggère que le produit final est neutre (Schmidt, 1991).
2'	2	Une neutralisation acidobasique peut former une solution acide.	V	
3	M-2	L'arrangement des atomes dans HOCl est H-O-Cl.	V	La formule chimique représente la structure chimique (Yarroch, 1985).
3'	M-1	L'arrangement des atomes dans HNO ₂ est H-N-O-O.	F	
4	2	L'eau bout toujours à 0 °C.	F	La température d'ébullition d'une substance est toujours la même (Coştu <i>et al.</i> , 2007)
4'	1	L'eau bout toujours à 100 °C.	F	
5	M-1	Le bris d'une liaison chimique provoque une disparition d'énergie.	F	Le bris d'une liaison entraîne un dégagement d'énergie (Galley, 2004)
5'	M-2	Le bris d'une liaison chimique provoque un dégagement d'énergie.	F	
6	1	Le charbon peut brûler.	V	Le diamant peut brûler (Potvin, Skelling-Desmeules et Sy, 2015).
6'	2	Le diamant peut brûler.	V	
7	2	Les bulles de gaz qui se forment dans l'eau à ébullition sont faites d'hélium.	F	Les bulles dans un liquide en ébullition sont composées d'air (Johnson, 1998).
7'	2	Les bulles de gaz qui se forment dans l'eau à ébullition sont faites d'eau.	V	

Numéro	Session	Énoncé	Réponse	Conception alternative
8	1	Un clou peinturé pèse moins qu'un clou neuf.	F	La rouille entraîne une diminution de la masse (Mulford et Robinson, 2002).
8'	2	Un clou rouillé pèse plus qu'un clou neuf.	V	
9	1	Tous les composés sont faits d'éléments	V	Les composés ioniques forment des molécules (Kind, 2004).
9'	1	Tous les composés sont faits de molécules	F	
10	1	Un atome d'or est mauve.	F	L'atome possède les propriétés physiques de son élément (Ben-Zvi, Eylon et Silberstein, 1986).
10'	1	Un atome d'or est doré.	F	
11	1	Tous les éléments répertoriés sont dangereux.	F	Tous les éléments radioactifs sont dangereux (Project MOSART, 2007).
11'	2	Tous les éléments radioactifs sont dangereux.	F	
12	2	L'eau liquide est plus dense que la vapeur d'eau.	V	Les solides sont plus lourds que les liquides (Durmuş & Bayraktar, 2010).
12'	1	L'eau gelée est plus dense que l'eau liquide.	F	
13	1	Le fer est un élément chimique.	V	Une substance pure est un élément (Kind, 2004).
13'	2	L'eau est un élément chimique.	F	
14	2	Il y a de l'énergie thermique dans le Soleil.	V	Seuls les objets chauds contiennent de l'énergie thermique (Herrmann-Abell et Deboer, 2010).
14'	1	Il y a de l'énergie thermique dans la glace.	V	
15	2	L'entropie d'un système peut augmenter.	V	L'entropie d'un système doit augmenter (Thomas et Schwenz, 1998).
15'	1	L'entropie d'un système peut diminuer.	V	
16	M-1	À l'équilibre, la concentration des réactifs peut être égale à celle des produits.	V	À l'équilibre, la concentration des réactifs est égale à celle des produits (Hackling et Garnett, 1985).
16'	M-2	À l'équilibre, la concentration des réactifs est toujours égale à celle des produits.	F	

Numéro	Session	Énoncé	Réponse	Conception alternative
17	1	L'eau bouillante s'évapore.	V	L'évaporation se produit seulement à ébullition (Coştu et Ayas, 2005).
17'	2	L'eau froide s'évapore.	V	
18	1	Le lait fond dans le thé chaud	F	Les solutés fondent lors de la dissolution (Driver, Rushworth, Squires et Wood-Robinson, 2013).
18'	2	Le sucre fond dans le thé chaud	F	
19	2	Les forces gravitationnelles sont des liaisons chimiques	F	Il existe deux types de liaisons : covalente ou ionique (Taber, 2002).
19'	1	Les forces intermoléculaires sont des liaisons chimiques.	V	
20	1	La force d'un acide dépend de son volume.	F	Plus un acide est concentré, plus il est fort (Hand, 1989).
20'	2	La force d'un acide dépend de sa concentration.	F	
21	2	Dans des conditions normales, le cuivre est un gaz.	F	L'état dans des conditions normales (à TPN) d'une substance est associée à l'état dans son utilisation courante (Talanquer, 2006).
21'	1	Dans des conditions normales, le chlore est un gaz.	V	
22	1	Lorsqu'un cube de glace fond, l'eau se décompose.	F	Plus la température augmente, plus le volume augmente (Osborne et Cosgrove, 1983).
22'	2	Lorsqu'un cube de glace fond, l'eau se contracte.	V	
23	2	L'atome de H est plus gros que l'atome de Fe.	F	Plus il y a de protons, plus l'atome est gros (Griffiths et Preston, 1992).
23'	1	L'atome de H est plus gros que l'atome de He.	V	
24	2	Les atomes dans H ₂ O sont liés par des liaisons covalentes.	V	Les ions polyatomiques sont formés de liaisons ioniques (Taber, 2002).
24'	1	Les atomes dans OH ⁻ sont liés par des liaisons covalentes.	V	

Numéro	Session	Énoncé	Réponse	Conception alternative
25	1	Il y a des liaisons covalentes dans les plastiques.	V	La liaison métallique est considérée comme une liaison covalente (Taber, 2002).
25'	1	Il y a des liaisons covalentes dans les métaux.	F	
26	M-2	La musique est faite de matière.	F	La fumée est immatérielle (Driver, Rushworth, Squires et Wood-Robinson, 2013).
26'	M-1	La fumée est faite de matière.	V	
27	2	La mole est une unité de longueur.	F	La mole est une unité de masse (Furio, Azcona et Guisasola, 2002).
27'	1	La mole est une unité de masse.	F	
28	1	Les neutrons repoussent les protons.	F	Les neutrons neutralisent les protons (Schmidt, Baumgärtner et Eybe, 2003).
28'	1	Les neutrons neutralisent les protons.	F	
29	1	Il y a 2 atomes de S dans 2SO_3 .	V	Les coefficients et les indices des formules chimiques ont la même fonction (Yarroch, 1985).
29'	2	Il y a 3 atomes de O dans 2SO_3 .	F	
30	M-2	Aucune molécule ne respecte la règle de l'octet.	F	Toutes les molécules respectent la règle de l'octet (Horton, 2007).
30'	M-1	Toutes les molécules respectent la règle de l'octet.	F	
31	1	Certaines molécules polaires ont des liaisons non polaires.	V	Une molécule est polaire parce qu'elle possède une liaison polaire (Birk et Kurtz, 1999).
31'	2	Certaines molécules non polaires ont des liaisons polaires.	V	
32	2	Chaque Na^+ se lie avec 9 Cl^- pour former les cristaux de NaCl.	F	Une liaison ionique peut uniquement se former entre deux ions (Taber, 2002).
32'	2	Chaque Na^+ se lie avec 6 Cl^- pour former les cristaux de NaCl.	V	

Numéro	Session	Énoncé	Réponse	Conception alternative
33	2	L'eau du robinet est à l'état solide.	F	Un solide doit être rigide (Stavy et Stachel, 1985).
33'	1	La pâte à modeler est à l'état solide.	V	
34	M-1	La solidification s'explique par la diminution de l'attraction des particules.	F	La solidification s'explique par le rapprochement des particules (Driver, Rushworth, Squires et Wood-Robinson, 2013).
34'	M-2	La solidification s'explique par la diminution du mouvement des particules.	V	
35	M-2	Un octet complet peut être plus stable qu'un octet incomplet.	V	Un octet complet est toujours plus stable (Taber, 2002)
35'	M-1	Un octet incomplet peut être plus stable qu'un octet complet.	V	
36	2	O est le symbole chimique de l'oxygène.	V	Le symbole chimique correspond à la première lettre de l'élément (Taskin et Bernholt, 2014).
36'	1	P est le symbole chimique du potassium.	F	
37	1	La température de l'eau tiède augmente lors du chauffage.	V	La température varie lors d'un changement de phase (Sadler <i>et al.</i> , 2007; Sadler <i>et al.</i> , 2010).
37'	2	La température de l'eau bouillante augmente lors du chauffage.	F	
38	1	Un thermomètre mesure la masse d'une substance.	F	La température et la chaleur sont la même chose (Driver, Rushworth, Squires et Wood-Robinson, 2013).
38'	1	Un thermomètre mesure la chaleur d'une substance.	F	
39	2	Un cube de fer contient des atomes.	V	Il n'y a pas d'espace entre les particules (Novick et Nussbaum, 1981).
39'	2	Un cube de fer contient du vide.	V	

Numéro	Session	Énoncé	Réponse	Conception alternative
40	M-1	Le chauffage d'une réaction endothermique augmente sa vitesse.	V	Chauffer une réaction exothermique n'augmente pas sa vitesse (Cakmakci, 2010).
40'	M-2	Le chauffage d'une réaction exothermique augmente sa vitesse.	V	

Tableau D.2 Liste des stimuli de la séance de pratique

Numéro	Énoncé	Bonne réponse
1	Les gaz inertes peuvent réagir	V
2	La digestion nécessite des réactions chimiques	V
3	Les atomes sont visibles à l'œil nu	F
4	Deux isotopes d'un même atome ont le même nombre de masse	F
5	Le volume d'eau augmente après l'ajout de sel	V
6	Le poids se mesure en gramme	F
7	Les atomes dans un solide sont désordonnés	F
8	La vision nécessite des réactions chimiques	V

APPENDICE E

PARAMÈTRES D'ACQUISITION DES IMAGES ANATOMIQUES ET FONCTIONNELLES

Images anatomiques (T1)	Séquence MPRage Appareil : Siemens TrioTim 3,0 T Temps de répétition = 2 300 ms Temps d'inversion = 900 ms Temps d'écho = 2,98 ms « Flip angle » = 9° Taille des pixels = 1,0 mm X 1,0 mm Ordre d'acquisition = « interleaved » Orientation des tranches = sagittale Nombre de tranches = 160 « Field of view » = 256 Résolution dans le plan (matrice) = 256 X 256 Antenne de tête : 32 canaux
Images fonctionnelles (T2*)	Appareil : Siemens TrioTim 3,0 T Temps de répétition : 2000 ms Temps d'écho : 30 ms « Flip angle » : 90° Taille des voxels : 3 x 3 x 3 mm Ordre d'acquisition : « interleaved » Orientation des tranches : AC-PC line Nombre de tranches : 33 Épaisseur des tranches : 3,0 mm Espace entre les tranches : 25 % « Field of view » : 192 Résolution dans le plan (matrice) : 64 x 64 Antenne de tête : 32 canaux

RÉFÉRENCES

- Abimbola, I. O. (1988). The problem of terminology in the study of student conceptions in science. *Science Education*, 72(2), 175-184. doi: 10.1002/sce.3730720206
- Albanese, A., Danhoni Neves, M. , Vicentini, M. (1997). Equilibrium, friction and dissipation: A review of the researches on students' ideas about motions. Dans S. Oblak, Hribar, M. , Luchner, K. , Munih, M. (dir.), *New ways of teaching physics. Proceedings of the GIREP-ICPE International Conference 1996 in Ljubljana* (p. 399-402). Ljubljana: Board of Education of Slovenia.
- Albanese, A. et Vicentini, M. (1997). Why do we believe that an atom is colourless? Reflections about the teaching of the particle model. *Science & Education*, 6(3), 251-261. doi: 10.1023/A:1017933500475
- Amaro, E. et Barker, G. J. (2006). Study design in fMRI: Basic principles. *Brain and cognition*, 60(3), 220-232.
- Aron, A. R., Behrens, T. E., Smith, S., Frank, M. J. et Poldrack, R. A. (2007). Triangulating a cognitive control network using diffusion-weighted magnetic resonance imaging (MRI) and functional MRI. *The Journal of Neuroscience*, 27(14), 3743.
- Aron, A. R., Robbins, T. W. et Poldrack, R. A. (2004). Inhibition and the right inferior frontal cortex. *Trends in Cognitive Sciences*, 8(4), 170-177. doi: 10.1016/j.tics.2004.02.010
- Aron, A. R., Robbins, T. W. et Poldrack, R. A. (2014). Inhibition and the right inferior frontal cortex: One decade on. *Trends in Cognitive Sciences*, 18(4), 177-185. doi: 10.1016/j.tics.2013.12.003
- Ashburner, J. et Friston, K. J. (2005). Unified segmentation. *NeuroImage*, 26(3), 839-851. doi: <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2005.02.018>
- Astolfi, J.-P. (1997). *L'erreur, un outil pour enseigner*. Paris: ESF éditeur.
- Astolfi, J.-P. (2010). *L'école pour apprendre*. (9^e éd.). Issy-les-Moulineaux: ESF éditeur.

- Astolfi, J.-P., Darot, É., Ginsburger-Vogel, Y. et Toussaint, J. (2008). *Mots-clés de la didactique des sciences: repères, définitions, bibliographies*. (2^e éd.). Bruxelles: De Boeck Supérieur.
- Astolfi, J.-P. et Develay, M. (2002). *La didactique des sciences*. (6^e éd.). Paris: Presses universitaires de France.
- Ausubel, D. P., Novak, J. et Hanesian, H. (1968). *Educational psychology: A cognitive view*. New York, NY: Holt, Rinehart and Winston.
- 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(6), 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(4), 627-639. doi: 10.1007/s10763-006-9031-1
- Babai, R., Eidelman, R. R. et Stavy, R. (2012). Preactivation of inhibitory control mechanisms hinders intuitive reasoning. *International Journal of Science and Mathematics Education*, 10(4), 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.
- 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(1), 20-26.
- Babai, R., Shalev, E. et Stavy, R. (2015). A warning intervention improves students' ability to overcome intuitive interference. *ZDM*, 1-11. doi: 10.1007/s11858-015-0670-y
- Babai, R., Younis, N. et Stavy, R. (2014). Involvement of inhibitory control mechanisms in overcoming intuitive interference. *Neuroeducation*, 3(1), 1-8.
- Babai, R., Zilber, H., Stavy, R. et Tirosh, D. (2010). The effect of intervention on accuracy of students' responses and reaction times to geometry problems. *International Journal of Science and Mathematics Education*, 8(1), 185-201. doi: 10.1007/s10763-009-9169-8
- Bachelard, G. (1938). *La formation de l'esprit scientifique*. Paris: Vrin.
- Bachelard, G. (1940). *La philosophie du non: essai d'une philosophie du nouvel esprit scientifique*. Paris: Presses Universitaires de France.

- Badre, D., Poldrack, R. A., Paré-Blagoev, E. J., Insler, R. Z. et Wagner, A. D. (2005). Dissociable controlled retrieval and generalized selection mechanisms in ventrolateral prefrontal cortex. *Neuron*, 47(6), 907-918. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.neuron.2005.07.023>
- Badre, D. et Wagner, A. D. (2007). Left ventrolateral prefrontal cortex and the cognitive control of memory. *Neuropsychologia*, 45(13), 2883-2901. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2007.06.015>
- Banich, M., Milham, M., Atchley, R., Cohen, N., Webb, A., Wszalek, T., . . . Magin, R. (2000). fMRI studies of Stroop tasks reveal unique roles of anterior and posterior brain systems in attentional selection. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 12(6), 988-1000. doi: 10.1162/08989290051137521
- Barbey, A. K., Koenigs, M. et Grafman, J. (2013). Dorsolateral prefrontal contributions to human working memory. *Cortex*, 49(5), 1195-1205. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cortex.2012.05.022>
- Barceló, F. (2003). The Madrid card sorting test (MCST): A task switching paradigm to study executive attention with event-related potentials. *Brain Research Protocols*, 11(1), 27-37. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S1385-299X\(03\)00013-8](http://dx.doi.org/10.1016/S1385-299X(03)00013-8)
- Barkley, R. A. (1999). Response inhibition in attention-deficit hyperactivity disorder. *Mental Retardation and Developmental Disabilities Research Reviews*, 5(3), 177-184. doi: 10.1002/(SICI)1098-2779(1999)5:3<177::AID-MRDD3>3.0.CO;2-G
- Bélanger, M. (2008). *Du changement conceptuel à la complexification conceptuelle dans l'apprentissage des sciences*. (Thèse de doctorat, Université de Montréal, Montréal).
- Bennett, C. M., Baird, A. A., Miller, M. B. et Wolford, G. L. (2010). Neural correlates of interspecies perspective taking in the post-mortem atlantic salmon: An argument for multiple comparisons correction. *Journal of Serendipitous and Unexpected Results*, 1(1), 1-5.
- Bennett, C. M., Wolford, G. L. et Miller, M. B. (2009). The principled control of false positives in neuroimaging. *Social Cognitive and Affective Neuroscience*, 4(4), 417-422. doi: 10.1093/scan/nsp053
- Ben-Zvi, R., Eylon, B.-S. et Silberstein, J. (1986). Is an atom of copper malleable? *Journal of Chemical Education*, 63(1), 64. doi: 10.1021/ed063p64

- Best, J. R. et Miller, P. H. (2010). A developmental perspective on executive function. *Child Development*, 81(6), 1641-1660. doi: 10.1111/j.1467-8624.2010.01499.x
- Binder, J. R., Desai, R. H., Graves, W. W. et Conant, L. L. (2009). Where is the semantic system? A critical review and meta-analysis of 120 functional neuroimaging studies. *Cerebral Cortex*, 19(12), 2767-2796. doi: 10.1093/cercor/bhp055
- Birk, J. P. et Kurtz, M. J. (1999). Effect of experience on retention and elimination of misconceptions about molecular structure and bonding. *Journal of Chemical Education*, 76(1), 124. doi: 10.1021/ed076p124
- Bjorklund, D. F. et Harnishfeger, K. K. (1995). The evolution of inhibition mechanisms and their role in human cognition and behavior. Dans F. N. D. J. B. J. Brainerd (dir.), *Interference and Inhibition in Cognition* (p. 141-173). San Diego: Academic Press.
- Blumenfeld, R. S., Parks, C. M., Yonelinas, A. P. et Ranganath, C. (2011). Putting the pieces together: The role of dorsolateral prefrontal cortex in relational memory encoding. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 23(1), 257-265. doi: 10.1162/jocn.2010.21459
- Blumenfeld, R. S. et Ranganath, C. (2007). Prefrontal cortex and long-term memory encoding: An integrative review of findings from neuropsychology and neuroimaging. *The Neuroscientist*, 13(3), 280-291. doi: 10.1177/1073858407299290
- Bodner, G. M. (1991). I have found you an argument: The conceptual knowledge of beginning chemistry graduate students. *Journal of Chemical Education*, 68(5), 385-388. doi: 10.1021/ed068p385
- Booth, J. R., Burman, D. D., Meyer, J. R., Lei, Z., Trommer, B. L., Davenport, N. D., . . . Marsel Mesulam, M. (2005). Larger deficits in brain networks for response inhibition than for visual selective attention in attention deficit hyperactivity disorder (ADHD). *Journal of Child Psychology and Psychiatry*, 46(1), 94-111. doi: 10.1111/j.1469-7610.2004.00337.x
- Borst, G., Poirel, N., Pineau, A., 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. *Developmental Psychology*, 49(7), 1366.

- Botvinick, M. (2007). Conflict monitoring and decision making: Reconciling two perspectives on anterior cingulate function. *Cognitive, Affective, & Behavioral Neuroscience*, 7(4), 356-366. doi: 10.3758/CABN.7.4.356
- Botvinick, M. M., Braver, T. S., Barch, D. M., Carter, C. S. et Cohen, J. D. (2001). Conflict monitoring and cognitive control. *Psychological Review*, 108(3), 624-652. doi: 10.1037/0033-295X.108.3.624
- Botvinick, M. M., Cohen, J. D. et Carter, C. S. (2004). Conflict monitoring and anterior cingulate cortex: An update. *Trends in Cognitive Sciences*, 8(12), 539-546. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.tics.2004.10.003>
- 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).
- Brault Foisy, L.-M., Potvin, P., Riopel, M. et Masson, S. (2015). Is inhibition involved in overcoming a common physics misconception in mechanics? *Trends in Neuroscience and Education*, 4(1), 26-36.
- Brewer, W. F. (2008). Naive theories of observational astronomy: Review, analysis, and theoretical implications. Dans S. Vosniadou (dir.), *International handbook of research on conceptual change* (p. 155-204). New York: Routledge.
- Brochu, P., Deussing, M.-A., Houme, K. et Chuy, M. (2013). *À la hauteur : Résultats canadiens de l'étude PISA de l'OCDE: Premiers résultats de 2012 pour les jeunes du Canada âgés de 15 ans*. Toronto: Conseil des ministres de l'Éducation (Canada).
- Brown, D. E. (1993). Refocusing core intuitions: A concretizing role for analogy in conceptual change. *Journal of Research in Science Teaching*, 30(10), 1273-1290.
- Brown, D. E. (2014). Students' conceptions as dynamically emergent structures. *Science & Education*, 23(7), 1463-1483. doi: 10.1007/s11191-013-9655-9
- 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(1), 35-45. doi: 10.1002/hbm.20128
- Bush, G., Frazier, J. A., Rauch, S. L., Seidman, L. J., Whalen, P. J., Jenike, M. A., . . . Biederman, J. (1999). Anterior cingulate cortex dysfunction in attention-deficit/hyperactivity disorder revealed by fMRI and the counting Stroop.

- Biological Psychiatry*, 45(12), 1542-1552. doi: [https://doi.org/10.1016/S0006-3223\(99\)00083-9](https://doi.org/10.1016/S0006-3223(99)00083-9)
- Bush, G., Luu, P. et Posner, M. I. (2000). Cognitive and emotional influences in anterior cingulate cortex. *Trends in Cognitive Sciences*, 4(6), 215-222. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S1364-6613\(00\)01483-2](http://dx.doi.org/10.1016/S1364-6613(00)01483-2)
- Bush, G., Whalen, P. J., Rosen, B. R., Jenike, M. A., McInerney, S. C. et Rauch, S. L. (1998). The counting Stroop: An interference task specialized for functional neuroimaging - validation study with functional MRI. *Human Brain Mapping*, 6(4), 270-282.
- Bush, G., Whalen, P. J., Shin, L. M. et Rauch, S. L. (2006). The counting Stroop: a cognitive interference task. *Nature Protocols*, 1(1), 230-233.
- Cakmakci, G. (2010). Identifying alternative conceptions of chemical kinetics among secondary school and undergraduate students in turkey. *Journal of Chemical Education*, 87(4), 449-455. doi: 10.1021/ed8001336
- Cai, W., Ryali, S., Chen, T., Li, C.-S. R. et Menon, V. (2014). Dissociable roles of right inferior frontal cortex and anterior insula in inhibitory control: Evidence from intrinsic and task-related functional parcellation, connectivity, and response profile analyses across multiple datasets. *The Journal of Neuroscience*, 34(44), 14652-14667. doi: 10.1523/JNEUROSCI.3048-14.2014
- Caramazza, A., McCloskey, M. et Green, B. (1981). Naive beliefs in “sophisticated” subjects: Misconceptions about trajectories of objects. *Cognition*, 9(2), 117-123. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/0010-0277\(81\)90007-X](http://dx.doi.org/10.1016/0010-0277(81)90007-X)
- Caravita, S. et Halldén, O. (1994). Re-framing the problem of conceptual change. *Learning and instruction*, 4(1), 89-111.
- Carey, S. (1985). *Conceptual change in childhood*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Carey, S. (2000). Science education as conceptual change. *Journal of Applied Developmental Psychology*, 21(1), 13-19. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0193-3973\(99\)00046-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0193-3973(99)00046-5)
- Chambers, C. D., Garavan, H. et Bellgrove, M. A. (2009). Insights into the neural basis of response inhibition from cognitive and clinical neuroscience. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 33(5), 631-646. doi: 10.1016/j.neubiorev.2008.08.016
- Chan, R. C. K., Shum, D., Touloupoulou, T. et Chen, E. Y. H. (2008). Assessment of executive functions: Review of instruments and identification of critical

- issues. *Archives of Clinical Neuropsychology*, 23(2), 201-216. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.acn.2007.08.010>
- Chang, L. J., Yarkoni, T., Khaw, M. W. et Sanfey, A. G. (2013). Decoding the role of the insula in human cognition: Functional parcellation and large-scale reverse inference. *Cerebral Cortex*, 23(3), 739-749. doi: 10.1093/cercor/bhs065
- Chao, H. H. A., Luo, X., Chang, J. L. K. et Li, C.-s. R. (2009). Activation of the pre-supplementary motor area but not inferior prefrontal cortex in association with short stop signal reaction time – an intra-subject analysis. *BMC Neuroscience*, 10, 75-75. doi: 10.1186/1471-2202-10-75
- Chi, M. T. H. (1992). Conceptual change within and across ontological categories: Examples from learning and discovery in science. Dans R. N. Giere (dir.), *Cognitive Models of Science: Minnesota Studies in the Philosophy of Science* (p. 129-160). Minneapolis: University of Minnesota 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). New York, NY: Routledge.
- 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(1), 27-43.
- Chikazoe, J., Konishi, S., Asari, T., Jimura, K. et Miyashita, Y. (2007). Activation of right inferior frontal gyrus during response inhibition across response modalities. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 19(1), 69-80.
- Chinn, C. A. et Samarapungavan, A. (2008). Learning to use scientific models: Multiple dimensions of conceptual change. Dans R. A. Duschl & R. E. Grandy (dir.), *Teaching scientific inquiry: Recommendations for research and implementation* (p. 191-225). Rotterdam, NL: Sense Publishers.
- Chinn, C. A. et Samarapungavan, A. (2009). Conceptual change—Multiple routes, Multiple mechanisms: A commentary on Ohlsson (2009). *Educational Psychologist*, 44(1), 48-57. doi: 10.1080/00461520802616291
- 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. doi: 10.1002/tea.3660301007
- Clement, J., Brown, D. E. et Zietsman, A. (1989). Not all preconceptions are misconceptions: Finding 'anchoring conceptions' for grounding instruction on

- students' intuitions. *International Journal of Science Education*, 11(5), 554-565. doi: 10.1080/0950069890110507
- Cohen, J. (1988). *Statistical power analysis for the behavioral sciences*. Hillsdale, New Jersey: Erlbaum.
- Collette, F., Van der Linden, M., Delfiore, G., Degueldre, C., Luxen, A. et Salmon, E. (2001). The functional anatomy of inhibition processes investigated with the Hayling task. *NeuroImage*, 14(2), 258-267. doi: <http://dx.doi.org/10.1006/nimg.2001.0846>
- Conseil des sciences, de la technologie et de l'innovation. (2013). L'état des lieux en 2012 *Le système des sciences, de la technologie et de l'innovation au Canada : Aspirer au leadership mondial*. Ottawa: Conseil consultatif du gouvernement du Canada.
- Conseil supérieur de l'éducation (2013). *L'enseignement de la science et de la technologie au primaire et au premier cycle du secondaire*. Québec: Gouvernement du Québec.
- Coştu, B. et Ayas, A. (2005). Evaporation in different liquids: Secondary students' conceptions. *Research in Science & Technological Education*, 23(1), 75-97. doi: 10.1080/02635140500068476
- Coştu, B., Ayas, A., Niaz, M., Ünal, S. et Calik, M. (2007). Facilitating conceptual change in students' understanding of boiling concept. *Journal of Science Education and Technology*, 16(6), 524-536.
- Crosbie, J., Arnold, P., Paterson, A., Swanson, J., Dupuis, A., Li, X., . . . Schachar, R. J. (2013). Response inhibition and ADHD traits: Correlates and heritability in a community sample. *Journal of Abnormal Child Psychology*, 41(3), 497-507. doi: 10.1007/s10802-012-9693-9
- Crosbie, J. et Schachar, R. (2001). Deficient inhibition as a marker for familial ADHD. *American Journal of Psychiatry*, 158(11), 1884-1890. doi: [doi:10.1176/appi.ajp.158.11.1884](https://doi.org/10.1176/appi.ajp.158.11.1884)
- Curtis, C. E. et D'Esposito, M. (2003). Persistent activity in the prefrontal cortex during working memory. *Trends in Cognitive Sciences*, 7(9), 415-423. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S1364-6613\(03\)00197-9](http://dx.doi.org/10.1016/S1364-6613(03)00197-9)
- Dagher, Z. R. (1994). Does the use of analogies contribute to conceptual change? *Science education*, 78(6), 601-614.
- De Landsheere, G. et Mialaret, G. (1976). *Introduction à la recherche en éducation*. (4e^e éd.). Liège, Belgique: Georges Thone.

- De Neys, W. et Goel, V. (2011). Heuristics and biases in the brain: Dual neural pathways for decision making. Dans O. Vartanian & D. R. Mandel (dir.), *Neuroscience of Decision Making* (p. 125-142). New York: Psychology Press.
- 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
- DeBoer, G. E. (2000). Scientific literacy: Another look at its historical and contemporary meanings and its relationship to science education reform. *Journal of research in science teaching*, 37(6), 582-601.
- Derrfuss, J., Brass, M., Neumann, J. et Cramon, D. Y. v. (2005). Involvement of the inferior frontal junction in cognitive control: Meta-analyses of switching and Stroop studies. *Human Brain Mapping*, 25(1), 22-34. doi: 10.1002/hbm.20127
- Diamond, A. (2013). Executive functions. *Annual review of psychology*, 64, 135-168. doi: 10.1146/annurev-psych-113011-143750
- 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. Limón & L. Mason (dir.), *Reconsidering conceptual change: Issues in theory and practice* (p. 28-60). Netherlands: Springer Netherlands.
- diSessa, A. A. (2006). A history of conceptual change research: Threads and fault lines. Dans R. K. Sawyer (dir.), *The Cambridge handbook of the learning sciences*. (p. 265-281). New York, NY: 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*. New York: Routledge.
- diSessa, A. A. et Sherin, B. L. (1998). What changes in conceptual change? *International Journal of Science Education*, 20(10), 1155-1191. doi: 10.1080/0950069980201002
- Drechsler, M. et Schmidt, H.-J. (2005). Textbooks' and teachers' understanding of acid-base models used in chemistry teaching. *Chemistry Education Research and Practice*, 6(1), 19-35.
- Driver, R., Rushworth, P., Squires, A. et Wood-Robinson, V. (2013). *Making sense of secondary science: Research into children's ideas*. New York, NY: Routledge.

- 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.
- Duit, R. et Treagust, D. F. (2012). Conceptual change: Still a powerful framework for improving the practice of science instruction. Dans K. C. D. Tan & M. Kim (dir.), *Issues and Challenges in Science Education Research* (p. 43-54). Netherlands: Springer Netherlands.
- Dunbar, K., Fugelsang, J. A. et Stein, C. (2007). Do naïve theories ever go away? Using brain and behavior to understand changes in concepts. Dans M. Lovett & P. Shah (dir.), *Thinking with data* (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 in Neurosciences*, 23(10), 475-483. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0166-2236\(00\)01633-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0166-2236(00)01633-7)
- Durmuş, J., & Bayraktar, Ş. (2010). Effects of conceptual change texts and laboratory experiments on fourth grade students' understanding of matter and change concepts. *Journal of Science Education and Technology*, 19(5), 498-504.
- Eling, P., Derckx, K. et Maes, R. (2008). On the historical and conceptual background of the Wisconsin Card Sorting Test. *Brain and Cognition*, 67(3), 247-253. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.bandc.2008.01.006>
- Evans, J. S. B. T. (2003). In two minds: Dual-process accounts of reasoning. *Trends in Cognitive Sciences*, 7(10), 454-459. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.tics.2003.08.012>
- Evans, J. S. B. T. (2008). Dual-processing accounts of reasoning, judgment, and social cognition. *Annual Review of Psychology*, 59(1), 255-278. doi: [doi:10.1146/annurev.psych.59.103006.093629](https://doi.org/10.1146/annurev.psych.59.103006.093629)
- Evans, J. S. B. T. (2011). Dual-process theories of reasoning: Contemporary issues and developmental applications. *Developmental Review*, 31(2-3), 86-102. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.dr.2011.07.007>
- Evans, J. S. B. T. et Stanovich, K. E. (2013). Dual-process theories of higher cognition: Advancing the debate. *Perspectives on Psychological Science*, 8(3), 223-241. doi: [10.1177/1745691612460685](https://doi.org/10.1177/1745691612460685)
- Fanget, F. (2007). De l'inhibition sociale à l'anxiété sociale. *Le Journal des psychologues*, 1(244), 24-28.
- Festinger, L. (1957). *A theory of cognitive dissonance*. Stanford: Stanford University Press.

- Flesch, R. (1948). A new readability yardstick. *Journal of Applied Psychology*, 32(3), 221-233. doi: 10.1037/h0057532
- Fletcher, P., Palomero-Gallagher, N., Zafiris, O., Fink, G., Tyler, L. et Zilles, K. (2002). The influence of explicit instructions and stimulus material on lateral frontal responses to an encoding task. *Neuroimage*, 17(2), 780-791.
- Floden, D. et Stuss, D. T. (2006). Inhibitory control is slowed in patients with right superior medial frontal damage. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 18(11), 1843-1849. doi: 10.1162/jocn.2006.18.11.1843
- Flores-Camacho, F., Gallegos-Cázares, L., Garritz, A. et García-Franco, A. (2006). Incommensurability and multiple models: Representations of the structure of matter in undergraduate chemistry students. *Science & Education*, 16(7), 775-800. doi: 10.1007/s11191-006-9049-3
- Frankish, K. et Evans, J. S. B. T. (2009). The duality of mind: An historical perspective. Dans J. S. B. T. Evans & K. Frankish (dir.), *In two minds: Dual processes and beyond* (p. 1-30). Oxford: Oxford University Press.
- Freud, S. (1926). *Inhibition, symptôme et angoisse*. (7^e éd.). Paris: Presses Universitaires de France.
- Friedman, N. P. et Miyake, A. (2017). Unity and diversity of executive functions: Individual differences as a window on cognitive structure. *Cortex*, 86, 186-204. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cortex.2016.04.023>
- Friston, K. J., Williams, S., Howard, R., Frackowiak, R. S. et Turner, R. (1996). Movement-related effects in fMRI time-series. *Magnetic Resonance in Medicine*, 35(3), 346-355.
- Furio, C., Azcona, R. et Guisasola, J. (2002). Difficulties in teaching the concepts of 'amount of substance' and 'mole'. *Chemistry Education: Research And Practice In Europe*, 3(3), 277-292.
- Gabel, D. (1999). Improving teaching and learning through chemistry education research: A look to the future. *Journal of Chemical Education*, 76(4), 548. doi: 10.1021/ed076p548
- Galley, W. C. (2004). Exothermic bond breaking: A persistent misconception. *Journal of Chemical Education*, 81(4), 523. doi: 10.1021/ed081p523
- 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(4), 1820-1829. doi: 10.1006/nimg.2002.1326

- Garnett, P. J., Garnett, P. J. et Hackling, M. W. (1995). Students' alternative conceptions in chemistry: A review of research and implications for teaching and learning. *Studies in Science Education*, 25, 69-95.
- Gerloff, C., Corwell, B., Chen, R., Hallett, M. et Cohen, L. G. (1997). Stimulation over the human supplementary motor area interferes with the organization of future elements in complex motor sequences. *Brain*, 120(9), 1587-1602. doi: 10.1093/brain/120.9.1587
- Gilbert, J. K., Osborne, R. J. et Fensham, P. J. (1982). Children's science and its consequences for teaching. *Science Education*, 66(4), 623-633. doi: 10.1002/sce.3730660412
- Giordan, A. et de Vecchi, G. (1987). *Les origines du savoir: des conceptions des apprenants aux concepts scientifiques*. Neuchâtel: Delachaux & Niestlé.
- Goldberg, R. F. et Thompson-Schill, S. L. (2009). Developmental "roots" in mature biological knowledge. *Psychological Science*, 20(4), 480-487. doi: 10.1111/j.1467-9280.2009.02320.x
- Grant, D. A. et Berg, E. (1948). A behavioral analysis of degree of reinforcement and ease of shifting to new responses in a Weigl-type card-sorting problem. *Journal of Experimental Psychology*, 38(4), 404-411. doi: 10.1037/h0059831
- Graulich, N. (2015). intuitive judgments govern students' answering patterns in multiple-choice exercises in organic chemistry. *Journal of Chemical Education*, 92(2), 205-211. doi: 10.1021/ed500641n
- Graulich, N., Hopf, H. et Schreiner, P. R. (2010). Heuristic thinking makes a chemist smart. *Chemical Society Reviews*, 39(5), 1503-1512. doi: 10.1039/B911536F
- Griffiths, A. K. et Preston, K. R. (1992). Grade-12 students' misconceptions relating to fundamental characteristics of atoms and molecules. *Journal of Research in Science Teaching*, 29(6), 611-628. doi: 10.1002/tea.3660290609
- Grosselin, A., Royer, A., Schneider, F., Brouillet, D., Martin, S., Pellet, J., . . . Massoubre, C. (2010). Inhibition des réponses automatiques au test du Hayling dans la schizophrénie. *L'Encephale*, 36(4), 277-284.
- Hand, B. (1989). Student understandings of acids and bases: A two year study. *Research in Science Education*, 19(1), 133-144. doi: 10.1007/BF02356853
- Hargreaves, D. H. (1999). Revitalising educational research: lessons from the past and proposals for the future. *Cambridge Journal of Education*, 29(2), 239-249. doi: 10.1080/0305764990290207

- 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(3), 352-381.
- Hashweh, M. (1988). Descriptive studies of students' conceptions in science. *Journal of Research in Science Teaching*, 25(2), 121-134. doi: 10.1002/tea.3660250204
- Hayward, G., Goodwin, G. et Harmer, C. (2004). The role of the anterior cingulate cortex in the counting Stroop task. *Experimental Brain Research*, 154(3), 355-358. doi: 10.1007/s00221-003-1665-4
- Heekeren, H. R., Marrett, S., Ruff, D. A., Bandettini, P. A. et Ungerleider, L. G. (2006). Involvement of human left dorsolateral prefrontal cortex in perceptual decision making is independent of response modality. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 103(26), 10023-10028. doi: 10.1073/pnas.0603949103
- Helm, H. (1980). Misconceptions in physics amongst South African students. *Physics Education*, 15(2), 92.
- Herrmann-Abell, C. et Deboer, G. (2010). *Probing middle and high school students' understanding of energy transformation, energy transfer, and conservation of energy using content-aligned assessment items*. Communication présentée à la Research in Science Teaching Annual Conference, Philadelphia, PA.
- Hewson, P. W. (1981). A conceptual change approach to learning science. *European Journal of Science Education*, 3(4), 383-396.
- Hofer, B. et Pintrich, P. (1997). The development of epistemological theories: Beliefs about knowledge and knowing and their relation to learning. *Review of educational research*, 67(1), 88-140.
- Horton, C. (2007). Student alternative conceptions in chemistry. *California Journal of Science Education*, 7(2), 18-38.
- Houdé, O. (2000). Inhibition and cognitive development: Object, number, categorization, and reasoning. *Cognitive Development*, 15(1), 63-73. doi: 10.1016/S0885-2014(00)00015-0
- Houdé, O. (2008). *Les 100 mots de la psychologie*. Paris: Presses Universitaires de France.
- Houdé, O. (2014a). *Apprendre à résister*. Paris: Le Pommier.
- Houdé, O. (2014b). *Le raisonnement*. Paris: Presses Universitaires de France.

- Houdé, O. et Borst, G. (2014). Measuring inhibitory control in children and adults: Brain imaging and mental chronometry. *Frontiers in Psychology*, 5. doi: 10.3389/fpsyg.2014.00616
- Houdé, O. et Borst, G. (2015). Evidence for an inhibitory-control theory of the reasoning brain. *Frontiers in Human Neuroscience*, 9. doi: 10.3389/fnhum.2015.00148
- Houdé, O. et Leroux, G. (2009). *Psychologie du développement cognitif*. Paris: Presses universitaires de France.
- Houdé, O. et Moutier, S. (1996). Deductive reasoning and experimental inhibition training: The case of the matching bias. *Cahiers de psychologie cognitive*, 15(4), 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. *Cahiers de psychologie cognitive*, 18(1), 75-85.
- Houdé, O., Zago, L., Crivello, F., Moutier, S., Pineau, A., Mazoyer, B. et Tzourio-Mazoyer, N. (2001). Access to deductive logic depends on a right ventromedial prefrontal area devoted to emotion and feeling: Evidence from a training paradigm. *NeuroImage*, 14(6), 1486-1492. doi: <http://dx.doi.org/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.
- Huettel, S. A., Song, A. W. et McCarthy, G. (2004). *Functional magnetic resonance imaging*. Sunderland, USA: Sinauer Associates Inc.
- Iidaka, T., Sadato, N., Yamada, H. et Yonekura, Y. (2000). Functional asymmetry of human prefrontal cortex in verbal and non-verbal episodic memory as revealed by fMRI. *Cognitive Brain Research*, 9(1), 73-83.
- Johnson, P. (1998). Children's understanding of changes of state involving the gas state, Part 1: Boiling water and the particle theory. *International Journal of Science Education*, 20(5), 567-583. doi: 10.1080/0950069980200505
- Johnstone, A. H. (1982). Macro-and micro-chemistry. *School Science Review*, 64, 377-379.

- Johnstone, A. H. (1991). Why is science difficult to learn? Things are seldom what they seem. *Journal of Computer Assisted Learning*, 7(2), 75-83. doi: 10.1111/j.1365-2729.1991.tb00230.x
- Johnstone, A. H. (2000a). Chemical education research: Where from here? *University Chemistry Education*, 4(1), 32-36.
- Johnstone, A. H. (2000b). Teaching of chemistry-Logical or psychological? *Chemistry Education Research and Practice*, 1(1), 9-15.
- Josse, G. et Tzourio-Mazoyer, N. (2004). Hemispheric specialization for language. *Brain Research Reviews*, 44(1), 1-12. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.brainresrev.2003.10.001>
- Kahneman, D. (2011). *Thinking, fast and slow*. Macmillan.
- Kahneman, D. et Klein, G. (2009). Conditions for intuitive expertise: A failure to disagree. *American psychologist*, 64(6), 515-526.
- Kampourakis, K. (2007). Teleology in biology, chemistry and physics education: What primary teachers should know. *Review Of Science, Mathematics And ICT Education*, 1(2), 81-93.
- 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. (2012). Professional physical scientists display tenacious teleological tendencies: Purpose-based reasoning as a cognitive default. *Journal of Experimental Psychology: General*, 1-10. doi: 10.1037/a0030399
- Kelley, W. M., Miezin, F. M., McDermott, K. B., Buckner, R. L., Raichle, M. E., Cohen, N. J., . . . Snyder, A. Z. (1998). Hemispheric specialization in human dorsal frontal cortex and medial temporal lobe for verbal and nonverbal memory encoding. *Neuron*, 20(5), 927-936.
- Kind, V. (2004). *Beyond appearances: Students' misconceptions about basic chemical ideas*. London: Royal Society of Chemistry.
- Krnel, D., Glažar, S. S. et Watson, R. (2003). The development of the concept of "matter": A cross-age study of how children classify materials. *Science Education*, 87(5), 621-639. doi: 10.1002/sce.10080
- Kuhn, T. S. (1962). *The structure of scientific revolutions*. Chicago, Il: University of Chicago press.

- Kurth, F., Zilles, K., Fox, P. T., Laird, A. R. et Eickhoff, S. B. (2010). A link between the systems: Functional differentiation and integration within the human insula revealed by meta-analysis. *Brain Structure and Function*, 214(5), 519-534. doi: 10.1007/s00429-010-0255-z
- 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(1), 44-62.
- Lafortune, S. (2013). *Le rôle de l'inhibition dans la capacité à surmonter des interférences intuitives en sciences*. (Mémoire de maîtrise, Université du Québec à Montréal, Montréal).
- 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 review and ALE meta-analysis in the Stroop task. *Human Brain Mapping*, 25(1), 6-21. doi: 10.1002/hbm.20129
- Larochelle, M. et Désautels, J. (1992). *Autour de l'idée de science*. Québec: Presses de l'Université Laval.
- Lee, K.-M., Chang, K.-H. et Roh, J.-K. (1999). Subregions within the supplementary motor area activated at different stages of movement preparation and execution. *NeuroImage*, 9(1), 117-123. doi: <http://dx.doi.org/10.1006/nimg.1998.0393>
- Legendre, M.-F. (2007). Enseigner les sciences dans une double perspective de continuité et de rupture. Dans P. Potvin, M. Riopel & S. Masson (dir.), *Regards multiples sur l'enseignement des sciences* (p. 293-307). Québec: MultiMondes.
- Legendre, R. (2005). *Dictionnaire actuel de l'éducation*. (3^e éd.). Montréal: Guérin.
- Levy Nahum, T., Mamlok-Naaman, R., Hofstein, A. et Taber, K. S. (2010). Teaching and learning the concept of chemical bonding. *Studies in Science Education*, 46(2), 179-207. doi: 10.1080/03057267.2010.504548
- Levy, B. J. et Wagner, A. D. (2011). Cognitive control and right ventrolateral prefrontal cortex: Reflexive reorienting, motor inhibition, and action updating. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1224(1), 40-62. doi: 10.1111/j.1749-6632.2011.05958.x
- 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. doi: 10.1002/1097-0193(200102)12:2<100::AID-HBM1007>3.0.CO;2-6

- 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), 1038-1049. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.neuroimage.2005.10.031>
- Limón, M. (2001). On the cognitive conflict as an instructional strategy for conceptual change: A critical appraisal. *Learning and Instruction*, 11(4-5), 357-380. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0959-4752\(00\)00037-2](http://dx.doi.org/10.1016/S0959-4752(00)00037-2)
- Linder, C. J. (1993). A challenge to conceptual change. *Science Education*, 77(3), 293-300. doi: 10.1002/sce.3730770304
- Liu, X. (2001). Synthesizing research on student conceptions in science. *International Journal of Science Education*, 23(1), 55-81. doi: 10.1080/09500690119778
- 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(11), 999-1006. doi: 10.1111/j.1467-9280.2007.02015.x
- MacDonald, A. W., Cohen, J. D., Stenger, V. A. et Carter, C. S. (2000). Dissociating the role of the dorsolateral prefrontal and anterior cingulate cortex in cognitive control. *Science*, 288(5472), 1835-1838. doi: 10.1126/science.288.5472.1835
- Maeyer, J. et Talanquer, V. (2010). The role of intuitive heuristics in students' thinking: Ranking chemical substances. *Science Education*, 94(6), 963-984.
- Maeyer, J. et Talanquer, V. (2013). Making predictions about chemical reactivity: Assumptions and heuristics. *Journal of Research in Science Teaching*, 50(6), 748-767. doi: 10.1002/tea.21092
- Masnick, A. M., Valenti, S. S., Cox, B. D. et Osman, C. J. (2009). A multidimensional scaling analysis of students' attitudes about science careers. *International Journal of Science Education*, 32(5), 653-667. doi: 10.1080/09500690902759053
- Mason, R. A. et Just, M. A. (2015). Physics instruction induces changes in neural knowledge representation during successive stages of learning. *NeuroImage*, 111(0), 36-48. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.neuroimage.2014.12.086>
- Masson, S. et Brault Foisy, L.-M. (2014). Fundamental concepts bridging education and the brain. *McGill Journal of Education*, 49(2), 501-512.
- Masson, S., Potvin, P., Riopel, M., Brault Foisy, L.-M. et Lafortune, S. (2012). Using fMRI to study conceptual change: Why and how? *International Journal of Environmental and Science Education*, 7(1), 19-35.

- Masson, S., Potvin, P., Riopel, M. et Brault Foisy, L. M. (2014). Differences in brain activation between novices and experts in science during a task involving a common misconception in electricity. *Mind, Brain, and Education*, 8(1), 44-55.
- Matthews, P. M. et Jezzard, P. (2004). Functional magnetic resonance imaging. *Journal of Neurology, Neurosurgery & Psychiatry*, 75(1), 6-12.
- McClary, L. (2010). *Of mental models, assumptions and heuristics: The case of acids and acid strength*. (Thèse de doctorat, Université de l'Arizona, Tucson, Arizona).
- McClary, L. et Talanquer, V. (2011). Heuristic reasoning in chemistry: Making decisions about acid strength. *International Journal of Science Education*, 33(10), 1433-1454. doi: 10.1080/09500693.2010.528463
- McDermott, K. B., Petersen, S. E., Watson, J. M. et Ojemann, J. G. (2003). A procedure for identifying regions preferentially activated by attention to semantic and phonological relations using functional magnetic resonance imaging. *Neuropsychologia*, 41(3), 293-303. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0028-3932\(02\)00162-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0028-3932(02)00162-8)
- Menon, V., Adelman, N. E., White, C. D., Glover, G. H. et Reiss, A. L. (2001). Error-related brain activation during a Go/NoGo response inhibition task. *Human Brain Mapping*, 12(3), 131-143. doi: 10.1002/1097-0193(200103)12:3<131::AID-HBM1010>3.0.CO;2-C
- Migne, J. (1970). Pédagogie et représentations. *Éducation permanente*, 8.
- Millar, R. (1991). Why is science hard to learn? *Journal of Computer Assisted Learning*, 7(2), 66-74. doi: 10.1111/j.1365-2729.1991.tb00229.x
- Millar, R. (2012). Rethinking science education: Meeting the challenge of "Science for All". *School Science Review*, 93(345), 21-30.
- Miller, E. K. et Cohen, J. D. (2001). An integrative theory of prefrontal cortex function. *Annual Review of Neuroscience*, 24(1), 167-202. doi: doi:10.1146/annurev.neuro.24.1.167
- Milner, B. (1963). Effects of different brain lesions on card sorting: The role of the frontal lobes. *Archives of Neurology*, 9(1), 90-100.
- Ministère de l'Éducation, du Loisir et du Sport. (2006). *Programme de formation de l'école québécoise: Enseignement secondaire, premier cycle*. Québec: Gouvernement du Québec.

- Mintzes, J. J. et Arnaud, M. W. (1984). *Children's biology: A review of research on conceptual development in the life sciences*. Washington: Office of Educational Research and Improvement.
- Mirabella, G. (2014). Should I stay or should I go? Conceptual underpinnings of goal-directed actions. *Frontiers in Systems Neuroscience*, 8, 206. doi: 10.3389/fnsys.2014.00206
- 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. *Journal of Neuroscience*, 21(19), 7733-7741.
- Mortimer, E. F. (1995). Conceptual change or conceptual profile change? *Science & Education*, 4(3), 267-285.
- Mortimer, E. F. et El-Hani, C. N. (2014). *Conceptual profiles: A theory of teaching and learning scientific concepts*. Dordrecht: Springer Science & Business Media.
- Mostofsky, S. H., Schafer, J. G. B., 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. *Cognitive Brain Research*, 17(2), 419-430. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0926-6410\(03\)00144-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0926-6410(03)00144-7)
- Mostofsky, S. H. et Simmonds, D. J. (2008). Response inhibition and response selection: Two sides of the same coin. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 20(5), 751-761. doi: 10.1162/jocn.2008.20500
- Mulford, D. R. et Robinson, W. R. (2002). An inventory for alternate conceptions among first-semester general chemistry students. *Journal of Chemical Education*, 79(6).
- Nachev, P., Kennard, C. et Husain, M. (2008). Functional role of the supplementary and pre-supplementary motor areas. *Nature Reviews Neuroscience*, 9(11), 856-869. doi: http://www.nature.com/nrn/journal/v9/n11/supinfo/nrn2478_S1.html
- Nachev, P., Wydell, H., O'Neill, K., Husain, M. et Kennard, C. (2007). The role of the pre-supplementary motor area in the control of action. *Neuroimage*, 36(3-3), T155-T163. doi: 10.1016/j.neuroimage.2007.03.034
- Nakhleh, M. B. et Mitchell, R. C. (1993). Concept learning versus problem solving: There is a difference. *Journal of Chemical Education*, 70(3), 190-192.

- Nathaniel-James, D. A., Fletcher, P. et Frith, C. D. (1997). The functional anatomy of verbal initiation and suppression using the Hayling test. *Neuropsychologia*, 35(4), 559-566. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0028-3932\(96\)00104-2](http://dx.doi.org/10.1016/S0028-3932(96)00104-2)
- 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. doi: 10.3758/CABN.7.1.1
- Nelson, J. K., Lizcano, R. A., Atkins, L. et Dunbar, K. (2007). *Conceptuel judgments of expert vs. novice chemistry students: An fMRI study*. Communication présentée au 48th Annual meeting of the Psychonomic Society, Hyatt Regency Hotel Long Beach, California.
- Neumann, J., Cramon, D. Y. v. et Lohmann, G. (2008). Model-based clustering of meta-analytic functional imaging data. *Human Brain Mapping*, 29(2), 177-192. doi: 10.1002/hbm.20380
- Neumann, J., Lohmann, G., Derrfuss, J. et Cramon, D. Y. v. (2005). Meta-analysis of functional imaging data using replicator dynamics. *Human Brain Mapping*, 25(1), 165-173. doi: 10.1002/hbm.20133
- Nigg, J. T. (2001). Is ADHD a disinhibitory disorder? *Psychological Bulletin*, 127(5), 571-598. doi: 10.1037/0033-2909.127.5.571
- Novick, S. et Nussbaum, J. (1981). Pupils' understanding of the particulate nature of matter: A cross-age study. *Science education*, 65(2), 187-196.
- Nozari, N., Mirman, D. et Thompson-Schill, S. L. (2016). The ventrolateral prefrontal cortex facilitates processing of sentential context to locate referents. *Brain and Language*, 157, 1-13. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.bandl.2016.04.006>
- Nussbaum, J. (1979). Children's conceptions of the earth as a cosmic body: A cross age study. *Science Education*, 63(1), 83-93. doi: 10.1002/sce.3730630113
- Nussbaum, J. et Novick, S. (1982). Alternative frameworks, conceptual conflict and accommodation: Toward a principled teaching strategy. *Instructional Science*, 11(3), 183-200. doi: 10.1007/BF00414279
- Nyhus, E. et Barceló, F. (2009). The Wisconsin Card Sorting test and the cognitive assessment of prefrontal executive functions: A critical update. *Brain and Cognition*, 71(3), 437-451. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.bandc.2009.03.005>
- O'Grady, K., Deussing, M.-A., Scerbina, T., Fung, K. et Muhe, N. (2016). *À la hauteur : Résultats canadiens de l'étude PISA de l'OCDE : Premiers résultats*

de 2015 pour les jeunes du Canada âgés de 15 ans. Toronto: Conseil des ministres de l'Éducation.

- Obeso, I., Robles, N., Marrón, E. M. et Redolar-Ripoll, D. (2013). Dissociating the role of the pre-SMA in response inhibition and switching: A combined online and offline TMS approach. *Frontiers in Human Neuroscience*, 7, 150. doi: 10.3389/fnhum.2013.00150
- OCDE (2007). *PISA 2006: Les compétences en sciences, un atout pour réussir: Volume 1 Analyse.* Paris: OECD Publishing.
- OCDE (2008). *Encouraging student interest in science and technology studies.* Paris: OECD Publishing.
- Ohlsson, S. (2009). Resubsumption: A possible mechanism for conceptual change and belief revision. *Educational Psychologist*, 44(1), 20-40.
- Osborne, R. J. et Cosgrove, M. M. (1983). Children's conceptions of the changes of state of water. *Journal of Research in Science Teaching*, 20(9), 825-838. doi: 10.1002/tea.3660200905
- Osborne, R. J. et Gilbert, J. K. (1980). A technique for exploring students' views of the world. *Physics Education*, 15(6), 376.
- Özdemir, G. et Clark, D. B. (2007). An overview of conceptual change theories. *Eurasia Journal of Mathematics, Science & Technology Education*, 3(4), 351-361.
- 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.
- Peterson, B. S., Kane, M. J., Alexander, G. M., Lacadie, C., Skudlarski, P., Leung, H.-C., . . . Gore, J. C. (2002). An event-related functional MRI study comparing interference effects in the Simon and Stroop tasks. *Cognitive Brain Research*, 13(3), 427-440. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0926-6410\(02\)00054-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0926-6410(02)00054-X)
- Petitto, L.-A. et Dunbar, K. (2004). *New findings from educational neuroscience on bilingual brains, scientific brains, and the educated mind.* Communication présentée Conference on Building Usable Knowledge in Mind, Brain, & Education, Havard Graduate School of Education.

- Petrides, M. (2005). Lateral prefrontal cortex: Architectonic and functional organization. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 360(1456), 781-795. doi: 10.1098/rstb.2005.1631
- Petrides, M. et Pandya, D. N. (2002). Comparative cytoarchitectonic analysis of the human and the macaque ventrolateral prefrontal cortex and corticocortical connection patterns in the monkey. *European Journal of Neuroscience*, 16(2), 291-310. doi: 10.1046/j.1460-9568.2001.02090.x
- Pfundt, H. et Duit, R. (2009). *Students' alternative frameworks and science education: Bibliography*. Kiel: IPN.
- Piaget, J. (1985). *The equilibration of cognitive structures: The central problem of intellectual development*. Chicago, IL: University of Chicago Press.
- Picton, T. W., Stuss, D. T., Alexander, M. P., Shallice, T., Binns, M. A. et Gillingham, S. (2007). Effects of focal frontal lesions on response inhibition. *Cerebral cortex*, 17(4), 826-838. doi: 10.1093/cercor/bhk031
- 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. doi: 10.3102/00346543063002167
- 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., Wagner, A. D., Prull, M. W., Desmond, J. E., Glover, G. H. et Gabrieli, J. D. E. (1999). Functional specialization for semantic and phonological processing in the left inferior prefrontal cortex. *NeuroImage*, 10(1), 15-35. doi: <http://dx.doi.org/10.1006/nimg.1999.0441>
- 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, M. et DiGirolamo, G. (1998). Executive attention: Conflict, target detection, and cognitive control. Dans R. Parasuraman (dir.), *The attentive brain* (p. 401-423). Cambridge, MA: MIT Press.
- Potvin, P. (2002). *Regard épistémique sur une évolution conceptuelle en physique au secondaire*. (Thèse de doctorat, Université de Montréal, Montréal).
- Potvin, P. (2011). *Manuel d'enseignement des sciences et de la technologie*. 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. (2017). 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. (2017). 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*.
- Potvin, P., Masson, S., Lafortune, S. et Cyr, G. (2014). Persistence of the intuitive conception that heavier objects sink more: A reaction time study with different levels of interference. *International Journal of Science and Mathematics Education*, 13(1), 1-23.
- Potvin, P., Sauriol, É. et Riopel, M. (2015). Experimental evidence of the superiority of the prevalence model of conceptual change over the classical models and repetition. *Journal of Research in Science Teaching*. doi: 10.1002/tea.21235
- Potvin, P., Skelling-Desmeules, Y. et Sy, O. (2015). Exploring secondary students' conceptions about fire using a two-tier, true/false, easy-to-use diagnostic test. *Journal of Education in Science, Environment and Health*, 1(2), 63-78.
- Potvin, P. et Thouin, M. (2003). Étude qualitative d'évolutions conceptuelles en contexte d'explorations libres en physique-mécanique au secondaire. *Revue des sciences de l'éducation*, 29(3), 525-544.
- Potvin, P., Turmel, É. et Masson, S. (2014). Linking neuroscientific research on decision making to the educational context of novice students assigned to a multiple-choice scientific task involving common misconceptions about electrical circuits. *Frontiers in human neuroscience*, 8(14), 1-13.
- Pozo, J., Gómez, M. et Sanz, A. (1999). When change does not mean replacement: Different representations for different contexts. Dans W. Schnotz, S. Vosniadou & M. Carretero (dir.), *New perspectives on conceptual change* (p. 161-174). Amsterdam: Pergamon.
- Project MOSART. (2007). *MOSART Chemistry Test*. Cambridge, Massachusetts: Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics.

- Pujol, J., Deus, J., Losilla, J. M. et Capdevila, A. (1999). Cerebral lateralization of language in normal left-handed people studied by functional MRI. *Neurology*, 52(5), 1038-1043.
- Reid, N. (2000). The presentation of chemistry: Logically driven or applications-led? *Chemistry Education: Research and Practice in Europe*, 1(3), 381-392.
- Reuter, Y., Cohen-Azria, C., Daunay, B., Delcambre, I. et Lahanier-Reuter, D. (2013). *Dictionnaire des concepts fondamentaux des didactiques*. (3^e éd.). Bruxelles: De Boeck Supérieur.
- Rhodes, S. M., Booth, J. N., Campbell, L. E., Blythe, R. A., Wheate, N. J. et Delibegovic, M. (2014). Evidence for a role of executive functions in learning biology. *Infant and Child Development*, 23(1), 67-83. doi: 10.1002/icd.1823
- Rhodes, S. M., Booth, J. N., Palmer, L. E., Blythe, R. A., Delibegovic, M. et Wheate, N. J. (2016). Executive functions predict conceptual learning of science. *British Journal of Developmental Psychology*, 34(2), 261-275. doi: 10.1111/bjdp.12129
- 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
- Rusanen, A.-M. (2014). Towards to an explanation for conceptual change: A mechanistic alternative. *Science & Education*, 23(7), 1413-1425. doi: 10.1007/s11191-013-9656-8
- Rusanen, A.-M. et Pöyhönen, S. (2013). Concepts in change. *Science & Education*, 22(6), 1389-1403. doi: 10.1007/s11191-012-9489-x
- Sadler, P. M., Coyle, H., Miller, J. L., Cook-Smith, N., Dussault, M., & Gould, R. R. (2010). The Astronomy and Space Science Concept Inventory: Development and validation of assessment instruments aligned with the K-12 National Science Standards. *Astronomy Education Review*, 8(1). <https://doi.org/10.3847/AER2009024>
- Sadler, P. M., Coyle, H., Smith, N. C., Miller, J., Mintzes, J., Tanner, K., & Murray, J. (2013). Assessing the life science knowledge of students and teachers represented by the K-8 National Science Standards. *CBE-Life Sciences Education*, 12(3), 553-575.
- Salta, K. et Tzougraki, C. (2011). Conceptual versus algorithmic problem-solving: Focusing on problems dealing with conservation of matter in chemistry.

- Research in Science Education*, 41(4), 587-609. doi: 10.1007/s11165-010-9181-6
- Saussez, F. et Lessard, C. (2009). Entre orthodoxie et pluralisme, les enjeux de l'éducation basée sur la preuve. *Revue française de pédagogie*, 168, 111-136.
- Severens, E., Kühn, S., Hartsuiker, R. J. et Brass, M. (2012). Functional mechanisms involved in the internal inhibition of taboo words. *Social cognitive and affective neuroscience*, 7(4), 431-435. doi: 10.1093/scan/nsr030
- Schmidt, H. J. (1991). A label as a hidden persuader: Chemists' neutralization concept. *International Journal of Science Education*, 13(4), 459-471. doi: 10.1080/0950069910130409
- Schmidt, H.-J., Baumgärtner, T. et Eybe, H. (2003). Changing ideas about the periodic table of elements and students' alternative concepts of isotopes and allotropes. *Journal of Research in Science Teaching*, 40(3), 257-277. doi: 10.1002/tea.10076
- Shenhav, A., Botvinick, Matthew M. et Cohen, Jonathan D. (2013). The expected value of control: An integrative theory of anterior cingulate cortex function. *Neuron*, 79(2), 217-240. doi: 10.1016/j.neuron.2013.07.007
- Shenhav, A., Cohen, J. D. et Botvinick, M. M. (2016). Dorsal anterior cingulate cortex and the value of control. *Nature neuroscience*, 19(10), 1286-1291.
- Shtulman, A. et Harrington, K. (2015). Tensions between science and intuition across the lifespan. *Topics in Cognitive Science*, 1-20. doi: 10.1111/tops.12174
- Shtulman, A. et Valcarcel, J. (2012). Scientific knowledge suppresses but does not supplant earlier intuitions. *Cognition*, 124(2), 209-215.
- Siksou, M. (2007). Inhibitions. *Le Journal des psychologues*, 1(244), 22.
- 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(1), 224-232. doi: 10.1016/j.neuropsychologia.2007.07.015
- Sinatra, G. M. et Pintrich, P. R. (Dir.). (2003). *Intentional conceptual change*. Mahwah, NY: Lawrence Erlbaum Associates.
- Singer, T., Critchley, H. D. et Preuschoff, K. (2009). A common role of insula in feelings, empathy and uncertainty. *Trends in Cognitive Sciences*, 13(8), 334-340. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.tics.2009.05.001>

- Sirhan, G. (2007). Learning difficulties in chemistry: An overview. *Journal of Turkish Science Education*, 4(2), 2-20.
- Slavin, R. E. (2002). Evidence-based education policies: Transforming educational practice and research. *Educational Researcher*, 31(7), 15-21. doi: doi:10.3102/0013189X031007015
- Smith, J. P., diSessa, A. A. et Roschelle, J. (1994). Misconceptions reconceived: A constructivist analysis of knowledge in transition. *Journal of the Learning Sciences*, 3(2), 115-163. doi: 10.1207/s15327809jls0302_1
- Snyder, H. R., Banich, M. T. et Munakata, Y. (2011). Choosing our words: Retrieval and selection processes recruit shared neural substrates in left ventrolateral prefrontal cortex. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 23(11), 3470-3482. doi: 10.1162/jocn_a_00023
- Solomon, J. (1983). Learning about energy: How pupils think in two domains. *European Journal of Science Education*, 5(1), 49 - 59.
- Solomon, J. (1984). Prompts, cues and discrimination: The utilization of two separate knowledge systems. *European Journal of Science Education*, 6(3), 277-284.
- Song, Y. et Hakoda, Y. (2015). An fMRI study of the functional mechanisms of Stroop/reverse-Stroop effects. *Behavioural Brain Research*, 290(0), 187-196. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.bbr.2015.04.047>
- Spada, H. (1994). Conceptual change or multiple representations? *Learning and Instruction*, 4(1), 113-116.
- Stavy, R. et Babai, R. (2010). Overcoming intuitive interference in mathematics: Insights from behavioral, brain imaging and intervention studies. *ZDM*, 42(6), 621-633. doi: 10.1007/s11858-010-0251-z
- Stavy, R. et Stachel, D. (1985). Children's ideas about 'solid' and 'liquid'. *European Journal of Science Education*, 7(4), 407-421. doi: 10.1080/0140528850070409
- Stavy, R. et Tirosh, D. (2000). *How students (mis-) understand science and mathematics: Intuitive rules*. New York, NY: Teachers College Press.
- Steele, V. R., Aharoni, E., Munro, G. E., Calhoun, V. D., Nyalakanti, P., Stevens, M. C., . . . Kiehl, K. A. (2013). A large scale (N=102) functional neuroimaging study of response inhibition in a Go/NoGo task. *Behavioural Brain Research*, 256, 529-536. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.bbr.2013.06.001>

- Strike, K. A. et Posner, G. J. (1992). A revisionist theory of conceptual change. Dans R. A. Duschl & R. J. Hamilton (dir.), *Philosophy of science, cognitive psychology, and educational theory and practice* (p. 147-176). Albany: State University of New York Press.
- Stroop, J. R. (1935). Studies of interference in serial verbal reactions. *Journal of Experimental Psychology*, 18(6), 643-662. doi: 10.1037/h0054651
- Swick, D., Ashley, V. et Turken, A. U. (2008). Left inferior frontal gyrus is critical for response inhibition. *BMC Neuroscience*, 9(1), 102. doi: 10.1186/1471-2202-9-102
- Swick, D., Ashley, V. et Turken, A. U. (2011). Are the neural correlates of stopping and not going identical? Quantitative meta-analysis of two response inhibition tasks. *NeuroImage*, 56(3), 1655-1665. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.neuroimage.2011.02.070>
- Swick, D. et Chatham, C. H. (2014). Ten years of inhibition revisited. *Frontiers in Human Neuroscience*, 8(329). doi: 10.3389/fnhum.2014.00329
- Szaflarski, J. P., Binder, J. R., Possing, E. T., McKiernan, K. A., Ward, B. D. et Hammeke, T. A. (2002). Language lateralization in left-handed and ambidextrous people. *Neurology*, 59(2), 238-244.
- Taber, K. S. (2000). Multiple frameworks?: Evidence of manifold conceptions in individual cognitive structure. *International Journal of Science Education*, 22(4), 399-417. doi: 10.1080/095006900289813
- Taber, K. S. (2001a). Building the structural concepts of chemistry: Some considerations from educational research. *Chemistry Education Research and Practice*, 2(2), 123-158.
- Taber, K. S. (2001b). Shifting sands: A case study of conceptual development as competition between alternative conceptions. *International Journal of Science Education*, 23(7), 731-753. doi: 10.1080/09500690010006572
- Taber, K. S. (2002). *Chemical misconceptions: Prevention, diagnosis and cure*. London: Royal Society of Chemistry.
- Taber, K. S. (2009). College students' conceptions of chemical stability: The widespread adoption of a heuristic rule out of context and beyond its range of application. *International Journal of Science Education*, 31(10), 1333-1358. doi: 10.1080/09500690801975594

- Taber, K. S. (2013). Revisiting the chemistry triplet: Drawing upon the nature of chemical knowledge and the psychology of learning to inform chemistry education. *Chemistry Education Research and Practice*, 14(2), 156-168.
- Taber, K. S. (2014). The significance of implicit knowledge for learning and teaching chemistry. *Chemistry Education Research and Practice*, 15(4), 447-461. doi: 10.1039/C4RP00124A
- Taber, K. S. et García-Franco, A. (2010). Learning processes in chemistry: Drawing upon cognitive resources to learn about the particulate structure of matter. *Journal of the Learning Sciences*, 19(1), 99-142. doi: 10.1080/10508400903452868
- Taber, K. S. et Watts, M. (1996). The secret life of the chemical bond: Students' anthropomorphic and animistic references to bonding. *International Journal of Science Education*, 18(5), 557-568. doi: 10.1080/0950069960180505
- Talanquer, V. (2006). Commonsense chemistry: A model for understanding students' alternative conceptions. *Journal of Chemical Education*, 83(5), 811-816.
- Talanquer, V. (2007). Explanations and teleology in chemistry education. *International Journal of Science Education*, 29(7), 853-870. doi: 10.1080/09500690601087632
- Talanquer, V. (2009). On cognitive constraints and learning progressions: The case of "structure of matter". *International Journal of Science Education*, 31(15), 2123-2136. doi: 10.1080/09500690802578025
- Talanquer, V. (2011). Macro, submicro, and symbolic: The many faces of the chemistry "triplet". *International Journal of Science Education*, 33(2), 179-195.
- Talanquer, V. (2014). Chemistry education: Ten heuristics to tame. *Journal of Chemical Education*, 91(8), 1091-1097. doi: 10.1021/ed4008765
- Talanquer, V. (2015). Threshold concepts in chemistry: The critical role of implicit schemas. *Journal of Chemical Education*, 92(1), 3-9.
- Talanquer, V. et Pollard, J. (2010). Let's teach how we think instead of what we know. *Chemistry Education Research and Practice*, 11(2), 74-83. doi: 10.1039/C005349J
- Tallant, D. (1993). A review of misconceptions of electricity and electrical circuits. Dans J. Novak (dir.), *Proceedings of the Third International Seminar on Misconceptions and Educational Strategies in Science and Mathematics*. Ithaca, New York: Cornell University (distributed electronically).

- Tamm, L., Menon, V. et Reiss, A. L. (2002). Maturation of brain function associated with response inhibition. *Journal of the American Academy of Child & Adolescent Psychiatry*, 41(10), 1231-1238. doi: <http://dx.doi.org/10.1097/00004583-200210000-00013>
- Tanji, J. et Shima, K. (1994). Role for supplementary motor area cells in planning several movements ahead. *Nature*, 371(6496), 413-416.
- Taskin, V. et Bernholt, S. (2014). Students' understanding of chemical formulae: A review of empirical research. *International Journal of Science Education*, 36(1), 157-185. doi: 10.1080/09500693.2012.744492
- Thagard, P. (1992). *Conceptual revolutions*. Princeton, NJ: Princeton University Press.
- 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, Montréal).
- Thomas, P. L. et Schwenz, R. W. (1998). College physical chemistry students' conceptions of equilibrium and fundamental thermodynamics. *Journal of Research in Science Teaching*, 35(10), 1151-1160.
- Thompson-Schill, S. L. et Botvinick, M. M. (2006). Resolving conflict: A response to Martin and Cheng (2006). *Psychonomic Bulletin & Review*, 13(3), 402-408. doi: 10.3758/bf03193860
- Thompson-Schill, S. L., D'Esposito, M., Aguirre, G. K. et Farah, M. J. (1997). Role of left inferior prefrontal cortex in retrieval of semantic knowledge: A reevaluation. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 94(26), 14792-14797.
- Tipper, S. P. (2001). Does negative priming reflect inhibitory mechanisms? A review and integration of conflicting views. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 54(2), 321-343.
- Toulmin, S. E. (1972). *Human understanding: The collective use and evolution of concepts*. Princeton, N.J.: Princeton University Press.
- Towns, M. H., Raker, J. R., Becker, N., Harle, M. et Sutcliffe, J. (2012). The biochemistry tetrahedron and the development of the taxonomy of biochemistry external representations (TOBER). *Chemistry Education Research and Practice*, 13(3), 296-306.
- Tyson, L. M., Venville, G. J., Harrison, A. G. et Treagust, D. F. (1997). A multidimensional framework for interpreting conceptual change events in the

- classroom. *Science Education*, 81(4), 387-404. doi: 10.1002/(SICI)1098-237X(199707)81:4<387::AID-SCE2>3.0.CO;2-8
- Vanderhasselt, M.-A., De Raedt, R. et Baeken, C. (2009). Dorsolateral prefrontal cortex and Stroop performance: Tackling the lateralization. *Psychonomic Bulletin & Review*, 16(3), 609-612. doi: 10.3758/PBR.16.3.609
- Verbruggen, F. et Logan, G. D. (2008). Response inhibition in the Stop-Signal paradigm. *Trends in Cognitive Sciences*, 12(11), 418-424. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.tics.2008.07.005>
- Viennot, L. (1979). Spontaneous reasoning in elementary dynamics. *European Journal of Science Education*, 1(2), 205-221. doi: 10.1080/0140528790010209
- Vosniadou, S. (1994). Capturing and modeling the process of conceptual change. *Learning and instruction*, 4(1), 45-69.
- Vosniadou, S. (2002). On the nature of naïve physics. Dans M. Limón & L. Mason (dir.), *Reconsidering conceptual change*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.
- Vosniadou, S. (2008). Conceptual change research: An introduction. Dans S. Vosniadou (dir.), *International Handbook of Research on Conceptual Change*. New York, NY: Routledge.
- Vosniadou, S., Baltas, A. et Vamvakoussi, X. (Dir.). (2007). *Reframing the conceptual change approach in learning and instruction*. Oxford: Elsevier.
- Vosniadou, S. et Brewer, W. F. (1992). Mental models of the earth: A study of conceptual change in childhood. *Cognitive Psychology*, 24(4), 535-585. doi: [https://doi.org/10.1016/0010-0285\(92\)90018-W](https://doi.org/10.1016/0010-0285(92)90018-W)
- Vosniadou, S. et Ioannides, C. (1998). From conceptual development to science education: A psychological point of view. *International Journal of Science Education*, 20(10), 1213-1230. doi: 10.1080/0950069980201004
- Vosniadou, S. et Skopeliti, I. (2014). Conceptual change from the framework theory side of the fence. *Science & Education*, 23(7), 1427-1445. doi: 10.1007/s11191-013-9640-3
- Wagner, A. D., Paré-Blagoev, E. J., Clark, J. et Poldrack, R. A. (2001). Recovering meaning: Left prefrontal cortex guides controlled semantic retrieval. *Neuron*, 31(2), 329-338. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0896-6273\(01\)00359-2](http://dx.doi.org/10.1016/S0896-6273(01)00359-2)

- Wagner, A. D., Poldrack, R. A., Eldridge, L. L., Desmond, J. E., Glover, G. H. et E. Gabrieli, J. D. (1998). Material-specific lateralization of prefrontal activation during episodic encoding and retrieval. *NeuroReport*, 9(16).
- 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.
- Ward, J. (2015). *The Student's guide to cognitive neuroscience: Third edition*. New York, NY: Psychology Press.
- Wessel, J. R. et Aron, A. R. (2017). On the globality of motor suppression: unexpected events and their influence on behavior and cognition. *Neuron*, 93(2), 259-280. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.neuron.2016.12.013>
- Whalen, P. J., Bush, G., Shin, L. M. et Rauch, S. L. (2006). The emotional counting Stroop: A task for assessing emotional interference during brain imaging. *Nat. Protocols*, 1(1), 293-296.
- Wig, G. S., Miller, M. B., Kingstone, A. et Kelley, W. M. (2004). Separable routes to human memory formation: Dissociating task and material contributions in the prefrontal cortex. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 16(1), 139-148.
- Wilkinson, D. et Halligan, P. (2004). The relevance of behavioural measures for functional-imaging studies of cognition. *Nature Reviews Neuroscience*, 5(1), 67-73.
- Wu, H.-K. et Shah, P. (2004). Exploring visuospatial thinking in chemistry learning. *Science Education*, 88(3), 465-492.
- Yarroch, W. L. (1985). Student understanding of chemical equation balancing. *Journal of Research in Science Teaching*, 22(5), 449-459. doi: 10.1002/tea.3660220507
- Zaitchik, D. et Solomon, G. E. (2008). Animist thinking in the elderly and in patients with Alzheimer's disease. *Cognitive Neuropsychology*, 25(1), 27-37. doi: 10.1080/02643290801904059
- Zoller, U. (1990). Students' misunderstandings and misconceptions in college freshman chemistry (general and organic). *Journal of Research in Science Teaching*, 27(10), 1053-1065.