

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL

RELATION ENTRE LE CONTRÔLE INHIBITEUR ET LES DIFFICULTÉS DES  
ÉLÈVES À MOBILISER LES CONCEPTIONS SCIENTIFIQUES

THÈSE  
PRÉSENTÉE  
COMME EXIGENCE PARTIELLE  
DU DOCTORAT EN ÉDUCATION

PAR  
GENEVIÈVE ALLAIRE-DUQUETTE

MARS 2018

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL  
Service des bibliothèques

Avertissement

La diffusion de cette thèse se fait dans le respect des droits de son auteur, qui a signé le formulaire *Autorisation de reproduire et de diffuser un travail de recherche de cycles supérieurs* (SDU-522 – Rév.07-2011). Cette autorisation stipule que «conformément à l'article 11 du Règlement no 8 des études de cycles supérieurs, [l'auteur] concède à l'Université du Québec à Montréal une licence non exclusive d'utilisation et de publication de la totalité ou d'une partie importante de [son] travail de recherche pour des fins pédagogiques et non commerciales. Plus précisément, [l'auteur] autorise l'Université du Québec à Montréal à reproduire, diffuser, prêter, distribuer ou vendre des copies de [son] travail de recherche à des fins non commerciales sur quelque support que ce soit, y compris l'Internet. Cette licence et cette autorisation n'entraînent pas une renonciation de [la] part [de l'auteur] à [ses] droits moraux ni à [ses] droits de propriété intellectuelle. Sauf entente contraire, [l'auteur] conserve la liberté de diffuser et de commercialiser ou non ce travail dont [il] possède un exemplaire.»

*À ceux qui voient dans les erreurs des élèves la chance d'apprendre à mieux enseigner*

## REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier profondément mon directeur, Steve Masson, et mon codirecteur, Michel Bélanger, d'avoir si généreusement partagé leur expertise et de m'avoir permis de réaliser ce projet de thèse. Je me sens choyée d'avoir pu compter sur un comité de direction aussi présent et disponible. J'ai énormément appris de chacun d'eux, notamment de la rigueur et de la collégialité avec lesquelles ils abordent la recherche.

Je voudrais aussi remercier les commissions scolaires, les directions d'école, les enseignants, les élèves et les parents qui ont gracieusement consenti temps et énergie à ce projet. Je remercie Roland H. Grabner qui apporté sa précieuse collaboration. Je souhaite de plus souligner la contribution du personnel de l'Unité de Neuroimagerie Fonctionnelle du centre de recherche de l'Institut universitaire de gériatrie de Montréal qui a rendu possible la collecte de données en IRMf. Je remercie Daniel Kneeshaw et Catherine Mounier du département de biologie de l'UQAM pour leur aide dans la validation scientifique de la tâche cognitive utilisée dans la thèse. J'aimerais souligner la contribution importante de Marilyne Larose, Martin Riopel et Patrice Potvin à la conception de la tâche cognitive. Mes remerciements vont aussi à Jérémie Blanchette-Sarrasin, Guillaume Malenfant-Robichaud et Lorie-Marlène Brault Foisy qui ont participé à la collecte des données.

J'aimerais également remercier l'Équipe de recherche en éducation scientifique et technologique de l'Université du Québec à Montréal (ÉREST) qui offre un milieu exceptionnel pour mener des études doctorales. Un merci va également au Conseil de recherche en sciences humaines du Canada, à la faculté des sciences de l'éducation de

l'UQAM ainsi qu'à la Fondation Desjardins qui m'ont offert un soutien financier me permettant de me consacrer pleinement à mon doctorat.

Cette thèse est le résultat d'un travail d'équipe remarquable. Je souhaite ici témoigner toute ma reconnaissance à ceux et celles qui ont fait partie du parcours bien que je ne puisse pas tous et toutes les interpeler personnellement.

Enfin, je remercie tout spécialement ma famille et mes amis, pour des raisons évidentes.

## TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS.....	iii
LISTE DES TABLEAUX.....	ix
LISTE DES FIGURES .....	xi
LISTE DES ABRÉVIATIONS, DES SIGLES ET DES ACRONYMES.....	xii
RÉSUMÉ .....	xiii
INTRODUCTION .....	1
CHAPITRE 1 PROBLÉMATIQUE.....	4
1.1 L'apprentissage des concepts comme partie intégrante du développement de la culture scientifique.....	4
1.2 Quelques difficultés d'apprentissage des concepts scientifiques.....	6
1.3 Les conceptions spontanées des élèves.....	9
1.4 La persistance des conceptions spontanées.....	10
1.5 Le lien entre la persistance des conceptions et le contrôle inhibiteur.....	13
1.6 Le problème et l'objectif de la recherche .....	15
CHAPITRE 2 CADRE THÉORIQUE.....	18
2.1 Les conceptions spontanées .....	19
2.1.1 Une définition.....	19
2.1.2 Différentes perspectives sur la persistance des conceptions spontanées .....	22
2.1.3 La perspective de l'acquisition des conceptions .....	24
2.1.4 La perspective de la mobilisation des conceptions .....	27
2.1.5 Le positionnement de la recherche.....	34

2.2 Le lien entre les difficultés à mobiliser les conceptions et le contrôle inhibiteur.....	35
2.2.1 Les difficultés à mobiliser les conceptions .....	36
2.2.2 Le lien entre la mobilisation des conceptions et le contrôle inhibiteur.....	42
2.2.3 Le lien entre la mobilisation des conceptions en sciences et le contrôle inhibiteur .....	44
2.3 Le contrôle inhibiteur.....	51
2.3.1 Une définition.....	52
2.3.2 L'identification du réseau de régions cérébrales liés au contrôle inhibiteur .....	57
2.3.3 Une approche neuroscientifique à l'étude du contrôle inhibiteur .....	65
2.4 L'hypothèse de recherche.....	73
CHAPITRE 3 MÉTHODOLOGIE.....	76
3.1 Les participants .....	76
3.1.1 L'échantillon et la sélection .....	77
3.1.2 Le recrutement .....	80
3.2 L'instrumentation.....	84
3.2.1 L'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle.....	84
3.2.2 La tâche cognitive .....	85
3.2.3 Le protocole expérimental.....	89
3.3 le déroulement.....	92
3.3.1. Les consignes et la simulation.....	92
3.3.2 L'acquisition des images.....	94
3.4 L'analyse des données comportementales .....	96
3.5 L'analyse des données cérébrales .....	98
3.5.1 Le prétraitement des données.....	98
3.5.2 Le traitement des données .....	102
3.6 Les considérations éthiques .....	113
3.6.1 L'utilisation de l'irmf.....	113
3.6.2 L'obtention du consentement éclairé.....	115
3.6.3 Le respect de la confidentialité et de l'anonymat.....	115

CHAPITRE 4 RÉSULTATS ET DISCUSSION.....	116
4.1 Les résultats et l'interprétation.....	117
4.1.1 Les résultats comportementaux.....	117
4.1.2 Les résultats cérébraux.....	123
4.2 La discussion.....	134
4.2.1 Le retour sur l'hypothèse de recherche.....	134
4.2.2 Le contrôle inhibiteur et difficultés conceptuelles.....	139
4.2.3 Le contrôle inhibiteur et la mobilisation des conceptions.....	143
4.2.4 Les principales limites de la recherche.....	151
4.2.5 Les retombées éducatives.....	156
4.2.6 Quelques perspectives de recherche.....	161
CONCLUSION.....	164
RÉFÉRENCES.....	170
ANNEXE A QUESTIONS DE SÉLECTION DES PARTICIPANTS.....	203
ANNEXE B QUESTIONS DE COMPRÉHENSION DU FRANÇAIS ÉCRIT.....	212
ANNEXE C TÂCHE COGNITIVE.....	217
ANNEXE D FORMULAIRE D'INFORMATION ET DE CONSENTEMENT (MINEURS).....	225
ANNEXE E FORMULAIRE D'INFORMATION ET DE CONSENTEMENT (MAJEURS).....	234
ANNEXE F FORMULAIRE DE DÉPISTAGE.....	242
ANNEXE G PARAMÈTRES D'ACQUISITION DES IMAGES FONCTIONNELLES ET ANATOMIQUES.....	245
ANNEXE H PROTOCOLE DE COLLECTE.....	246

ANNEXE I – LETTRE D’INVITATION AUX PARENTS EN VUE DU RECRUTEMENT.....	249
ANNEXE J – MASQUES UTILISÉS LORS DE L’ANALYSE PAR RÉGIONS D’INTÉRÊT.....	250

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1 Sommaire des résultats de recherche sur le réseau cérébral associé au contrôle inhibiteur.....	61
Tableau 3.1 Profils des deux groupes de participants.....	83
Tableau 3.2 Exemple d'énoncés congruents et incongruents (V= vrai; F= faux) .....	87
Tableau 3.3 Plan complet à quatre cellules (2 X 2 modalités).....	106
Tableau 3.4 Moyennes marginales dans un design à 2X2 modalités .....	107
Tableau 4.1 Taux de réussite (en %) pour pour l'ensemble des énoncés des deux conditions.....	119
Tableau 4.2 Temps de réponse en millisecondes (ms) pour l'ensemble des énoncés des deux conditions .....	119
Tableau 4.3 Temps de réponse en millisecondes (ms) pour tous les énoncés réussis des deux conditions .....	122
Tableau 4.4 Effet d'interaction du groupe et de la condition par analyse par régions d'intérêt avec masques bilatéraux du cortex préfrontal ventrolatéral, du cortex préfrontal dorsolatéral et du cortex cingulaire antérieur.....	124
Tableau 4.5 Effet d'interaction du groupe et de la condition par analyse par régions d'intérêt avec masques latéralisés à gauche du cortex préfrontal ventrolatéral, du cortex préfrontal dorsolatéral et du cortex cingulaire antérieur.....	125

Tableau 4.6 Effet d'interaction du groupe et de la condition par analyse par régions d'intérêt avec masques latéralisés à droite du cortex préfrontal ventrolatéral, du cortex préfrontal dorsolatéral et du cortex cingulaire antérieur.....	126
Tableau 4.7 Régions cérébrales significativement associées à l'interaction du groupe (facilité/difficulté) et de la condition (congruent/incongruent) .....	127

## LISTE DES FIGURES

Figure 2.1 Le contrôle inhibiteur au sein des fonctions exécutives selon.....	54
Figure 2.2 Principales régions cérébrales associées au contrôle inhibiteur.....	62
Figure 3.1 Exemple d'une série et d'un bloc (incongruent) .....	91
Figure 3.2 Exemple de simulateur d'appareil d'IRMf .....	93
Figure 4.1 Région cérébrale significativement plus activée par l'interaction du groupe (facilité/difficulté) et de la condition (congruent/incongruent).....	128
Figure 4.2 Régions cérébrales significativement plus activées chez les élèves ayant de la facilité pour une condition par rapport à l'autre.....	130
Figure 4.3 Visualiation de l'effet d'interaction de l'activité cérébrale moyenne dans la région cérébrale identifiée par l'ANOVA.....	131

## LISTE DES ABRÉVIATIONS, DES SIGLES ET DES ACRONYMES

CCA : cortex cingulaire antérieur

CPDL: cortex préfrontal dorsolatéral

CPVL: cortex préfrontal ventrolatéral

IRMf: imagerie par résonance magnétique fonctionnelle

## RÉSUMÉ

Plusieurs élèves éprouvent des difficultés conceptuelles en sciences, c'est-à-dire des difficultés à répondre à des questions de nature qualitative qui ne requièrent pas l'usage d'outils mathématiques. Ces difficultés ont une incidence sur l'apprentissage des concepts scientifiques prévus dans les programmes scolaires, mais aussi sur le sentiment de compétence des élèves en sciences et donc aussi sur leur persévérance et leur réussite. Depuis la fin des années 1970, des études ont permis de révéler que ces difficultés sont notamment attribuables à la persistance de conceptions spontanées, des représentations intuitives du monde, qui sont incompatibles avec les connaissances scientifiques prévues dans les programmes scolaires. Les conceptions spontanées mènent donc souvent les élèves à donner des réponses scientifiquement inappropriées à des questions portant sur des phénomènes naturels, même après avoir reçu une éducation scientifique.

La persistance des conceptions spontanées a été abordée par plusieurs chercheurs dans une perspective de coexistence des conceptions spontanées et scientifiques. La thèse s'inscrit dans cette perspective où la persistance des conceptions spontanées est expliquée en partie par la difficulté à les faire coexister avec les conceptions scientifiques apprises. Il est effectivement difficile pour plusieurs élèves de mobiliser une conception appropriée dans le contexte scientifique, car les conceptions spontanées sont plus facilement accessibles et souvent automatiquement mobilisées. Ce recours automatique aux conceptions spontanées proviendrait notamment du fait que ces conceptions sont utiles dans plusieurs situations de la vie quotidienne et possèdent donc leurs propres contextes de validité. Conséquemment, elles sont largement renforcées et plus intuitivement mobilisées que les conceptions scientifiques.

Les recherches suggèrent donc que pour arriver à mobiliser les conceptions scientifiques, il faille avoir recours à un contrôle plus important des modes de pensée. Plusieurs études avancent que cette forme de raisonnement implique le contrôle inhibiteur, c'est-à-dire le contrôle ou le blocage des réponses ou de stratégies de pensée spontanées. Des recherches ont par exemple montré que des experts en sciences activent davantage que des novices le contrôle inhibiteur pour surmonter les difficultés que posent les conceptions spontanées en électricité et en mécanique.

Bien que prometteurs, les résultats de ces recherches portent sur des participants ayant différents niveaux de formation. Ainsi, le fait que des élèves ayant pourtant profité d'une instruction scientifique comparable éprouvent à des degrés variables des

difficultés conceptuelles demeure insuffisamment compris, notamment au regard de l'implication du contrôle inhibiteur. L'objectif de cette recherche consiste à vérifier si les difficultés conceptuelles des élèves sont associées à une plus faible activation du contrôle inhibiteur.

Or, il s'avère difficile de contribuer à mieux comprendre la relation entre ces difficultés et le contrôle inhibiteur à partir d'approches méthodologiques reposant sur des observations comportementales. L'activation du contrôle inhibiteur peut être masquée par les réponses, scientifiquement appropriées fournies par les élèves. De plus, l'inhibition des conceptions spontanées peut se produire de façon inconsciente et il n'est donc pas possible non plus de se fier uniquement à l'explicitation de leur démarche de raisonnement. Les tests neuropsychologiques, les temps de réponse ou l'amorçage négatif comportent également des limites importantes. Les tests neuropsychologiques ne permettent pas de mesurer l'implication du contrôle inhibiteur au cours d'une tâche. Les méthodes basées sur les temps de réponse et l'amorçage négatif, bien que répandues et validées, mènent à des interprétations qui sont largement dépendantes de la qualité de la tâche utilisée et de l'équivalence de la condition contrôle. Une approche basée sur l'utilisation de l'imagerie cérébrale permet de palier à certaines des limites des mesures comportementales et présente l'avantage d'observer l'activation du contrôle inhibiteur en temps réel, c'est-à-dire alors qu'une tâche est réalisée.

Depuis les premières études en neuropsychologie, le cortex préfrontal est connu comme une région cérébrale clé du contrôle inhibiteur. Les études en neuroimagerie montrent que le cortex préfrontal ventrolatéral (CPVL) et le cortex préfrontal dorsolatéral (CPDL) sont parmi les régions les plus activées pour inhiber une réponse spontanée. À ces régions, il faut ajouter le cortex cingulaire antérieur (CCA). Le CCA serait plus précisément associé à la détection d'un conflit et le cortex préfrontal (CPVL et CPDL) au contrôle inhibiteur subséquent. Cette étude vérifie ainsi l'hypothèse selon laquelle les élèves ayant plus de difficulté à mobiliser les conceptions scientifiques sous-activent des régions cérébrales associées au contrôle inhibiteur (CCA, CPVL, CPDL) par rapport à d'autres ayant plus de facilité.

Pour vérifier cette hypothèse, deux groupes de participants ont été comparés : un groupe de 12 élèves ayant des difficultés conceptuelles et un groupe de 12 élèves ayant plus de facilité. L'activité cérébrale des participants a été mesurée par IRMf alors qu'ils réalisaient une tâche cognitive où leur étaient présentés des énoncés concernant des concepts scientifiques abordés dans le programme de formation de l'école québécoise. Les participants, tous inscrits en 5<sup>e</sup> secondaire (16-17 ans) au cours de l'option sciences, devaient déterminer si les énoncés étaient scientifiquement corrects ou incorrects. La moitié des énoncés étaient congruents, c'est-à-dire qu'ils étaient compatibles avec les conceptions spontanées identifiées dans les recherches antérieures et reconnues comme répandues. L'autre moitié des énoncés étaient incongruents, c'est-

à-dire incompatibles avec les conceptions spontanées et requéraient par conséquent de mobiliser la conception scientifique pour donner une réponse appropriée dans ce contexte. Cette méthode a permis de comparer comment l'activité cérébrale des deux groupes diffère selon qu'ils répondent à des énoncés congruents ou incongruents.

Les résultats montrent que, par rapport aux élèves ayant de la facilité, les élèves ayant des difficultés conceptuelles n'ont pas autant ralenti leurs réponses et ils ont sous-activé des régions cérébrales préfrontales associées au contrôle inhibiteur (CPDL et CPVL) lors des énoncés incongruents. La principale conclusion est donc que, pour les élèves ayant des difficultés conceptuelles, il semble être plus difficile de contrôler l'activité dans les réseaux de neurones rattachés aux conceptions spontanées qui sont reconnus comme persistants, résistants et automatiquement activés. Les résultats appuient l'idée que certains élèves ont une moins grande capacité à inhiber ou bloquer l'activation intuitive et automatique des réseaux neuronaux rattachés aux conceptions spontanées pour en arriver à mobiliser les conceptions scientifiques.

En somme, à la lumière des résultats de cette recherche et de recherches antérieures, le contrôle inhibiteur semble être une partie importante du processus d'apprentissage des concepts scientifiques. Cette recherche a été menée dans l'espoir de mieux comprendre le lien entre les difficultés conceptuelles que vivent les élèves et le contrôle inhibiteur afin d'appuyer les enseignants en sciences dans la prise de décisions éducatives plus éclairées et dans le choix plus judicieux des interventions éducatives qui visent à les aider à apprendre les concepts scientifiques. L'idée d'une « didactique du contrôle inhibiteur » en sciences semble représenter un point de départ intéressant qui ouvre sur plusieurs autres pistes. Les résultats mènent en effet à envisager des pistes de recherche sur les interventions visant le développement de contrôle inhibiteur que les enseignements peuvent considérer pour mieux aider les élèves ayant des difficultés conceptuelles en sciences.

## INTRODUCTION

Depuis les années 1990, le développement des connaissances sur le cerveau et l'avènement de technologies d'imagerie cérébrale a donné naissance à une nouvelle approche de recherche en éducation : la neuroéducation. Cette approche propose d'étudier certains problèmes éducatifs à un niveau d'analyse jusqu'à tout récemment peu exploré : le niveau cérébral. De l'avis de plusieurs organisations internationales, la neuroéducation est susceptible d'enrichir considérablement nos connaissances sur l'apprentissage et l'enseignement.

Des recherches en neuroéducation ont déjà contribué au rapprochement entre l'étude de l'apprentissage des sciences et le cerveau en s'intéressant à l'obstacle que représentent les conceptions spontanées. Les élèves possèdent effectivement, avant même leurs premiers cours de sciences, des conceptions spontanées qui sont souvent incompatibles avec les conceptions scientifiques enseignées dans les programmes scolaires. Les conceptions spontanées peuvent donc mener les élèves à formuler des réponses scientifiquement inappropriées à des questions de nature qualitative en sciences, c'est-à-dire qui ne requièrent pas l'usage d'outils mathématiques. Longtemps, l'apprentissage conceptuel des sciences a été perçu comme un processus de remplacement ou de restructuration de ces conceptions spontanées afin de faire place aux notions scientifiques dans les structures cognitives de l'élève. Or, les conceptions spontanées se sont avérées plus persistantes que ce qui avait initialement été envisagé et plusieurs auteurs ont plutôt proposé l'idée d'une coexistence de conceptions tantôt spontanées et tantôt scientifiques.

Des recherches en neuroéducation ont d'ailleurs observé la trace de la persistance des conceptions spontanées dans le cerveau des experts. En effet, lorsque les experts évaluent la validité de films trompeurs qui illustrent une conception spontanée selon laquelle une balle plus lourde tombe plus vite qu'une balle plus légère, des régions de leur cerveau responsables du contrôle inhibiteur s'activent. Il semble donc que les experts mobilisent un mécanisme leur permettant de résister à des conceptions spontanées persistantes. On observe la même chose lorsque les experts évaluent la validité de circuits électriques montrant la conception spontanée selon laquelle un seul fil fait allumer une ampoule. Leurs conceptions spontanées ne seraient donc pas oubliées, remplacées, ou restructurées dans leur cerveau; elles sont plutôt bloquées lorsqu'elles mènent à une erreur. Ces premières études en neuroéducation appuient d'ailleurs plusieurs travaux en didactique des sciences qui suggèrent qu'enseigner les concepts scientifiques ce n'est pas seulement enseigner de nouveaux savoirs, c'est aussi, et peut-être surtout, aider les élèves à apprendre à inhiber leurs conceptions spontanées.

Toutes ces récentes recherches mènent à penser que non seulement les conceptions spontanées ne disparaissent pas, mais aussi que le contrôle inhibiteur est une habileté essentielle pour bloquer les conceptions spontanées et apprendre les concepts scientifiques. Or, bien que les résultats appuient l'idée d'un lien entre l'apprentissage des concepts scientifiques et le contrôle inhibiteur, ils sont limités à une population spécifique d'adultes spécialisés en sciences et ils portent sur un nombre limité de concepts dans le domaine de la physique. Ce lien n'est donc pas nécessairement transférable aux élèves en formation ni à la diversité de concepts scientifiques abordés dans les programmes d'études. Cette recherche a pour but d'étudier ce problème éducatif lié à l'apprentissage des sciences auprès d'une population d'élèves en formation et à partir de méthodes et de connaissances provenant des neurosciences cognitives.

La thèse comprend quatre chapitres. Le premier chapitre pose la problématique de la persistance des conceptions spontanées en sciences qui se trouve à l'origine de cette recherche et justifie la pertinence scientifique de s'intéresser au lien entre les difficultés conceptuelles des élèves et le contrôle inhibiteur. Dans le deuxième chapitre qui porte sur le cadre théorique, les recherches ayant abordé le phénomène de la persistance des conceptions spontanées et les difficultés des élèves à mobiliser les conceptions sont discutées, ce qui mène à formuler une hypothèse de recherche originale en s'inspirant de travaux en didactique des sciences, en psychologie cognitive ainsi qu'en neuroéducation. Le troisième chapitre présente la méthodologie employée pour vérifier l'hypothèse de cette recherche. Enfin, le quatrième et dernier chapitre de la thèse présente les résultats comportementaux et cérébraux obtenus en plus de discuter des liens entre les activations cérébrales observées et de l'objectif de cette recherche. Les résultats font ensuite l'objet d'une discussion et enfin, les retombées éducatives envisagées, les principales limites de l'étude et des perspectives de recherche sont présentées.

## CHAPITRE I

### PROBLÉMATIQUE

Cette recherche a pour objectif de mieux comprendre le lien entre le contrôle inhibiteur et certaines difficultés qu'éprouvent les élèves lors de l'apprentissage des concepts scientifiques. Ce premier chapitre présente la problématique de la persistance des conceptions spontanées en sciences qui se trouve à l'origine de cette recherche.

Le chapitre débute en situant l'apprentissage des concepts comme partie intégrante du développement de la culture scientifique. Puis, il présente quelques-unes des difficultés que les élèves rencontrent lors de l'apprentissage des concepts scientifiques en insistant sur les difficultés associées à la persistance des conceptions spontanées. Ensuite, la pertinence scientifique de s'intéresser au lien entre ces difficultés et le contrôle inhibiteur est justifiée. Enfin, l'objectif de recherche et les retombées envisagées sont énoncés.

#### 1.1 L'apprentissage des concepts comme partie intégrante du développement de la culture scientifique

Au sein des sociétés industrialisées, le développement de la culture scientifique représente non seulement un facteur de développement personnel et professionnel des individus, mais aussi un important levier de participation démocratique (Conseil des académies canadiennes, 2014; OCDE, 2007). La culture scientifique facilite la

participation à de nombreux débats de société comme le clonage, la vaccination, les pesticides, le don d'organe, l'énergie nucléaire ou le génie génétique (Godin, Gingras, & Bourneuf, 1997). Par exemple, pour s'engager dans les débats relatifs aux changements climatiques, il est nécessaire de comprendre l'effet des émissions de carbone sur la biosphère et, pour discuter des enjeux de résistance aux antibiotiques, les citoyens doivent comprendre le concept de la pression sélective. Il en va de même pour des questions comme la gestion des espèces envahissantes où la maîtrise de la notion d'écosystème ainsi que de compétition pour les ressources est requise.

Pour ces raisons, les collectivités ne peuvent faire l'économie d'une culture scientifique de base accessible au plus grand nombre (Bybee & DeBoer, 1994) qui suppose non seulement le développement d'un mode de raisonnement scientifique et une capacité à analyser des données, mais aussi l'apprentissage de concepts scientifiques (OCDE, 2010). Le Conseil de la science et de la technologie du Québec (2002, p. xvi) affirme justement qu' : « il convient de transmettre aux élèves le bagage de connaissances scientifiques (...) nécessaires à leur intégration réussie dans la société du savoir ». Pour ce faire, les sociétés doivent mettre en place un environnement facilitant l'acquisition de cette culture et qui tient compte des difficultés qui peuvent survenir lors de l'apprentissage des concepts scientifiques.

De nombreux milieux œuvrent à la mise en place d'un tel environnement et contribuent à faire connaître et à faire apprendre les concepts scientifiques fondamentaux. Parmi ceux-ci figurent les institutions éducatives non formelles dont les musées et les centres de sciences, les bibliothèques, les médias de même que certains organismes et associations. Or, c'est véritablement l'école comme institution sociale qui assume la plus grande part de responsabilité dans l'enseignement des concepts scientifiques au sein des collectivités en raison notamment du contact étroit et soutenu que les jeunes y entretiennent avec les sciences.

Au Québec, par exemple, conformément à sa mission (Gouvernement du Québec, 2006a), l'école doit permettre aux élèves de s'intégrer à la société en les aidant, entre autres, à acquérir plusieurs concepts scientifiques fondamentaux. Le programme de formation de l'enseignement primaire précise que « l'apprentissage de la science (...) est essentiel pour comprendre le monde dans lequel nous vivons » (Gouvernement du Québec, 2006b, p. 144) et le programme de formation de l'enseignement secondaire poursuit sur la même lancée en soutenant que « le contenu de formation permet d'assurer, dès le premier cycle, la construction d'une assise commune constituée des concepts fondamentaux en science. » (Gouvernement du Québec, 2006c, p. 282).

### 1.2 Quelques difficultés d'apprentissage des concepts scientifiques

L'apprentissage des concepts scientifiques fondamentaux se retrouve au cœur des programmes éducatifs nationaux des pays industrialisés. Toutefois, alors que les élèves réussissent globalement bien en sciences aux examens internationaux comme le Programme international pour le suivi des acquis des élèves (PISA) (OCDE, 2007, 2010, 2014), l'apprentissage de nombreux concepts scientifiques demeure difficile pour plusieurs d'entre eux. Une enquête du Conseil de la science et de la technologie du Québec (2002) révèle par exemple que même après avoir suivi un cours secondaire, une proportion importante des adolescents et des adultes arrivent difficilement à fournir une réponse valable à des questions élémentaires concernant des phénomènes naturels. Près de 40 % des participants ont répondu à tort que du lait radioactif peut être rendu sain en le faisant bouillir, environ 50 % d'entre eux affirment que les lasers font converger des ondes sonores alors qu'il s'agit d'ondes lumineuses et plus de 60 % soutiennent de manière erronée que les antibiotiques peuvent combattre les virus.

Il semble donc que les résultats encourageants des enquêtes internationales comme le PISA peuvent cacher certaines difficultés dans l'apprentissage des concepts scientifiques. Il est possible que les élèves arrivent à répondre aux questions de ces

examens en appliquant sans trop réfléchir des algorithmes mathématiques (Gabel, Sherwood, & Enochs, 1984; Lin, Hung, & Hung, 2002) ou sans nécessairement comprendre la nature des variables ou des concepts impliqués. Les résultats d'examens dont le *Trends in International Mathematics and Science Study (TIMSS)* montrent d'ailleurs qu'une majorité d'élèves arrivent difficilement à donner une explication scientifiquement valide à des questions concernant des concepts scientifiques fondamentaux (Martin, Mullis, & Foy, 2008; Martin, Mullis, Foy, & Hooper, 2016; Martin, Mullis, Foy, & Stanco, 2012; OCDE, 2010, 2014). L'enquête *TIMSS* 2015 révèle que près de 85 % des élèves de 13-14 ans atteignent les exigences d'un niveau de culture scientifique minimal, c'est-à-dire qu'ils arrivent à reconnaître et nommer les concepts scientifiques fondamentaux. Toutefois, plus de 35 % d'entre eux éprouvent des difficultés à faire usage des concepts scientifiques dans le contexte d'un énoncé ou d'un schéma (Martin et al., 2016). Pour ces élèves, l'apprentissage peut donc être difficile et les enseignants ont la responsabilité d'aider ces élèves à mieux apprendre et apprécier les sciences.

Les défis que pose l'apprentissage des concepts scientifiques peuvent être associés à différents facteurs dont des difficultés inhérentes aux disciplines scientifiques comme le recours à des concepts abstraits (Duit, 1991), une terminologie complexe (Snow, 2010) ou à un raisonnement multiniveaux (Johnstone, 1991). La physique requiert par exemple que les élèves jonglent à la fois avec des macrophénomènes tangibles et visibles comme la chute d'un objet, des microphénomènes invisibles comme des forces ou des réactions ainsi que des phénomènes symboliques représentés par des formules mathématiques. Il en est de même en biologie où les élèves doivent s'approprier des connaissances relatives aux macrophénomènes comme les végétaux, aux microphénomènes comme la cellule et enfin aux phénomènes symboliques biochimiques comme la respiration cellulaire. D'autres travaux ont plutôt associé les difficultés dans l'apprentissage des concepts scientifiques à des inégalités de développement des structures cognitives faisant de certains élèves des apprenants plus

« doués » pour les sciences. Dans cette perspective, les difficultés des élèves dans l'apprentissage de concepts scientifiques s'expliqueraient par un sous-développement de la pensée abstraite ou formelle (Chiappetta, 1976; Jordan & Brownlee, 1981; Renner, 1976).

Or, depuis les années 1970, des travaux ont permis de révéler que les difficultés dans l'apprentissage des concepts scientifiques peuvent aussi être attribuables aux conceptions spontanées que les élèves entretiennent à l'égard des phénomènes naturels (Carey, 2000). Ces conceptions sont, de manière générale, des « connaissances qu'un sujet mobilise face à une question ou une thématique, que celle-ci ait fait l'objet d'un enseignement ou pas » (Reuter, Cohen-Azria, Daunay, Delcambre, & Lahanier-Reuter, 2007, p. 197). Les conceptions spontanées posent parfois problème lors de l'apprentissage puisqu'elles peuvent mener les élèves à formuler des réponses scientifiquement inappropriées à des questions qui concernent les concepts scientifiques enseignés. Par exemple, plus de 90 % des élèves de 10 à 14 ans concevraient, tout comme les enfants d'âge préscolaire, que les objets coulent en raison de leur poids (Penner & Klahr, 1996) alors que la flottabilité dépend, dans un modèle simplifié, non pas du poids<sup>1</sup> de l'objet, mais de sa densité relative par rapport au liquide dans lequel il est immergé. Une étude plus récente (Potvin, Masson, Lafortune, & Cyr, 2014) a montré que cette conception est toujours spontanément utilisée par les élèves de 14-15 ans lorsqu'ils doivent déterminer laquelle de deux balles aura le plus tendance à couler dans un récipient rempli d'eau.

---

<sup>1</sup> Le principe physique de flottabilité est en réalité plus complexe, mais l'explication de la densité relative comme modèle simplifié est suffisante pour les besoins de cette thèse. Une explication plus complète se trouve dans des ouvrages comme « Daily, J.W. and Harleman, D.R. (1966). *Fluid dynamics*. Lawrence's Boook : Torrance, United States of America. »

### 1.3 Les conceptions spontanées des élèves

En contexte francophone, cette idée d'un « déjà-là » venant interférer avec certains apprentissages en sciences apparaît dès les travaux Bachelard (1934) en philosophie des sciences. Toutefois, c'est en prenant surtout appui sur la théorie piagétienne du développement de l'enfant ainsi que les travaux en épistémologie des sciences (Kuhn, 1962; Lakatos, 1970) que des didacticiens des sciences ont proposé de considérer les conceptions spontanées comme l'une des sources de difficultés lors de l'apprentissage des concepts scientifiques (Duit, 2007; Posner, Strike, Hewson, & Gertzog, 1982). Vosniadou (1994) a par exemple observé que plusieurs élèves débutent leur scolarité en entretenant une conception spontanée à l'égard de la gravité voulant que celle-ci s'exerce vers le bas, donc dans un seul sens, comme c'est en apparence le cas dans l'expérience quotidienne. Cette conception spontanée, qui proviendrait selon Vosniadou (1994) de présupposés ontologiques, présente avant l'enseignement même du concept scientifique, peut mener les élèves à répondre à tort qu'un caillou n'exerce pas de force d'attraction sur la Terre et rend plus difficile l'apprentissage du concept d'attraction gravitationnelle (Gunstone & Watts, 1985).

À ce jour, des recherches ont permis d'identifier les conceptions spontanées les plus fréquentes (Wandersee, Mintzes, & Novak, 1994), par exemple, un seul fil est nécessaire pour allumer une ampoule (Periago & Bohigas, 2005), un projectile perd de la force au cours de sa trajectoire (Hestenes, Wells, & Swackhamer, 1992), la glace est plus dense que l'eau liquide (Tatar, 2011) ou encore les objets plus lourds tombent plus vite (Sequeira & Leite, 1991). Plusieurs inventaires de conceptions spontanées dans divers domaines scientifiques ont d'ailleurs été publiés (Athanasiou & Mavrikaki, 2013; Hestenes et al., 1992).

Les explications des élèves prennent souvent appui sur ces conceptions. Par exemple, si un élève explique qu'à un niveau microscopique un cube de fer ne contient

pas de vide, celui-ci s'appuie vraisemblablement sur une conception spontanée selon laquelle la matière est continue. Les conceptions spontanées des élèves ont reçu différentes dénominations (Abimbola, 1988; Confrey, 1990). Certains chercheurs mettent l'accent sur leur statut inférieur en les nommant « fausses conceptions » (Guzetti, Snyder, Glass, & Gamas, 1993) alors que d'autres mettent en relief l'aspect rudimentaire des conceptions en choisissant plutôt « conceptions naïves » (Weller, 1995) ou « préconceptions » (Nussbaum & Novick, 1982). Enfin, d'autres travaux ont davantage mis en relief leur aspect instrumentaliste, c'est-à-dire d'outils intellectuels alternatifs, en utilisant le terme « conceptions alternatives » (Millar, 1989). Dans cette recherche, le terme « conception spontanée » sera utilisé pour référer à l'ensemble des conceptions qui sont spontanément utilisées et qui sont totalement ou partiellement incompatibles avec les connaissances scientifiques prévues dans les programmes scolaires.

Malgré la diversité des désignations, les recherches font globalement consensus sur le fait que les conceptions spontanées peuvent mener les élèves à formuler des réponses scientifiquement inappropriées à des questions portant sur des concepts scientifiques qui requièrent de prédire, expliquer ou décrire des phénomènes naturels de manière qualitative, c'est-à-dire sans l'usage d'outils mathématiques. Les recherches convergent également vers l'idée selon laquelle les conceptions spontanées engendrent des difficultés dans l'apprentissage de nombreux concepts scientifiques (diSessa, 1982; Einsen & Stavy, 1988; Jungwirth, 1975; Viennot, 1979; Wandersee, Mintzes, & Novak, 1994) et qu'elles se manifestent chez des individus de différents âges et de différentes cultures (Stavy, Babai, et al., 2006; Wandersee et al., 1994).

#### 1.4 La persistance des conceptions spontanées

Les conceptions spontanées ne représenteraient pas un problème éducatif aussi préoccupant si elles ne persistaient pas autant. En effet, des études révèlent que les

conceptions spontanées peuvent entraîner des difficultés dans l'apprentissage de concepts en biologie au niveau postsecondaire comme la reproduction, le système vasculaire ou les gènes. Ozgur (2013) a par exemple observé que de nombreux étudiants continuent d'adhérer à des conceptions spontanées dans ce domaine même après avoir un reçu une formation universitaire. Par exemple, 50 % des étudiants adhèrent à la conception spontanée selon laquelle le cœur nettoie le sang. Pourtant, la maîtrise des concepts fondamentaux en biologie humaine est un préalable essentiel à la compréhension d'enjeux de société relatifs à la santé.

Plusieurs conceptions spontanées persistent aussi au niveau universitaire (Confrey, 1990; Driver & Easley, 1978; Periago & Bohigas, 2005; Treagust & Duit, 2008; Wandersee et al., 1994). Une autre étude révèle par exemple qu'après deux ans d'étude en génie électrique, 10 % des étudiants du baccalauréat continuent d'adhérer à la conception spontanée selon laquelle un seul fil est nécessaire pour faire allumer une ampoule (Periago & Bohigas, 2005). En physique, ce sont 25 % des étudiants de première année de baccalauréat qui continuent de concevoir que les objets plus lourds tombent plus rapidement (Gunstone & White, 1981) et plus de 65 % des étudiants conçoivent que pour être en mouvement un objet doit subir une force dans la même direction (Halloun & Hestenes, 1985).

Certaines conceptions spontanées persisteraient donc même après un enseignement formel des concepts scientifiques (diSessa, 2006; Periago & Bohigas, 2005). Cette persistance pourrait notamment s'expliquer par le fait que les conceptions spontanées peuvent s'avérer utiles dans de nombreux contextes autres que le contexte des sciences et donc elles seraient autant sinon plus viables que les conceptions scientifiques d'un même phénomène naturel (Larochelle & Désautels, 1992; Potvin, Sauriol, & Riopel, 2015). Plusieurs conceptions spontanées suffisent en effet à expliquer des phénomènes naturels dans le contexte de la vie quotidienne. Par exemple, l'observation du lever et du coucher du Soleil peut reposer sur la conception spontanée selon laquelle le Soleil

tourne autour de la Terre. Il en va de même pour l'expérience du branchement d'une lampe dans une prise murale qui peut s'accompagner d'une conception spontanée selon laquelle dans un circuit électrique, un seul fil est nécessaire pour faire allumer une ampoule.

Des recherches suggèrent donc que les élèves puissent posséder à la fois des conceptions spontanées et des conceptions scientifiques à l'égard des phénomènes naturels qui peuvent être mobilisées pour fournir des réponses à des questions portant sur des concepts scientifiques (p.ex. Shtulman & Valcarcel, 2012; Solomon, 1983). Après un cours de physique mécanique, les élèves possèderaient par exemple plusieurs conceptions à leur disposition pour répondre à une question sur le concept de collision. Parmi celles-ci se retrouverait une conception spontanée aristotélicienne selon laquelle une force doit être appliquée sur un objet pour qu'il se déplace ainsi qu'une conception newtonienne plus scientifique de la conservation de quantité de mouvement (Maloney & Siegler, 1993).

Or, les conceptions spontanées ne persistent pas de la même façon et autant chez tous les élèves. Certains élèves semblent adhérer davantage et plus longtemps aux conceptions spontanées (Sinatra & Mason, 2013). Bien qu'encore peu nombreuses, un nombre croissant de recherches s'intéressent aux aspects individuels impliqués dans la persistance des conceptions spontanées. Ces études sont surtout orientées vers les facteurs affectifs (Pintrich, Marx, & Boyle, 1993). Sinatra et Mason (2013) rapportent que les différences individuelles peuvent notamment être associées à l'intérêt (Linnenbrink-Garcia, Pugh, Koskey, & Stewart, 2012), aux objectifs d'apprentissage (Taasoobshirazi & Sinatra, 2011), à l'attitude (Broughton, Sinatra, & Nussbaum, 2013) ou encore au sentiment d'auto-efficacité personnelle (Cordova, Sinatra, Broughton, & Taasoobshirazi, 2011). Toutefois, peu de recherches ont porté sur les différences individuelles se rapportant au mécanisme permettant de mobiliser les conceptions lors d'une tâche de nature scientifique. Le lien entre le contrôle inhibiteur et la persistance

des conceptions spontanées fait l'objet des deux prochaines sections. La pertinence de s'intéresser à ce mécanisme comme un facteur pouvant expliquer les différences individuelles est également justifiée.

### 1.5 Le lien entre la persistance des conceptions et le contrôle inhibiteur

La persistance des conceptions spontanées a été abordée par plusieurs chercheurs dans une perspective de coexistence des conceptions spontanées et scientifiques (p.ex. Bélanger, 2008; Potvin, 2013; Solomon, 1983) et il s'agit de la perspective retenue dans cette recherche. Pour ces auteurs, la persistance s'expliquerait en partie par le fait que les élèves possèderaient plusieurs conceptions à l'égard d'un même phénomène naturel et que ces conceptions se révèlent parfois scientifiques alors que d'autres sont plus spontanées. À titre d'exemple, une étude a montré que, pour une quarantaine de concepts scientifiques, il faut plus de temps à de jeunes adultes pour donner une réponse scientifiquement appropriée à des questions où la coexistence de conceptions spontanées et scientifiques peut poser problème (Shtulman & Valcarcel, 2012). Par exemple, pour déterminer si la glace contient de la chaleur, une conception spontanée persistante voulant que la chaleur soit la sensation de ce qui est chaud peut mener à répondre « non » alors qu'une conception scientifique selon laquelle la chaleur est une forme d'énergie mènerait à répondre « oui » puisque tout ce qui est au-dessus de zéro Kelvin possède de l'énergie thermique. À l'inverse, pour déterminer si le feu contient de la chaleur, la coexistence de la conception spontanée et de la conception scientifique ne pose pas problème, c'est-à-dire que les deux conceptions mènent à répondre « oui » puisque celui-ci procure une sensation de chaleur et contient de l'énergie thermique. En moyenne, il a fallu plus de temps pour répondre au premier type de question qu'au deuxième type. Cet écart entre le temps nécessaire pour répondre aux deux types de questions laisse penser que la réponse est plus longue à fournir pour les questions du premier type puisqu'il serait nécessaire de réaliser une sélection parmi plusieurs conceptions pouvant mener à donner différentes réponses.

D'autres recherches appuient cette hypothèse et ont observé que, s'ils ont un temps limité pour répondre, des novices et des scientifiques professionnels commettraient plus d'erreurs lorsqu'ils répondent à des questions où la coexistence de conceptions spontanées et scientifiques peut poser problème (Kelemen & Rosset, 2009; Kelemen, Rottman, & Seston, 2012). Les participants avaient en effet plus tendance à juger des explications téléologiques activées spontanément comme étant scientifiquement appropriées (p.ex. La mousse pousse sur les roches pour prévenir l'érosion ou Les arbres produisent de l'oxygène pour permettre aux animaux de respirer). Deux études récentes ont d'ailleurs obtenu des résultats allant dans le même sens en utilisant, en plus du taux d'erreur et du temps de réponse, une mesure de l'activité cérébrale (Brault Foisy, Potvin, Riopel, & Masson, 2015; Masson, Potvin, Riopel, & Brault Foisy, 2014). Leurs résultats montrent que lorsqu'ils répondent de manière scientifiquement appropriée à des questions en électricité et en mécanique où la coexistence de conceptions spontanées et scientifiques peut poser problème, les experts en sciences activent davantage que les novices des régions du cerveau associées au contrôle inhibiteur, c'est-à-dire le contrôle ou le blocage des réponses ou des stratégies de pensée spontanées. Ces résultats suggèrent que les experts contrôlent toujours, malgré leur formation en sciences, la mobilisation d'une conception par rapport à une autre pour donner des réponses scientifiquement appropriées. Ces recherches sont présentées plus en détail dans le deuxième chapitre.

En somme, des recherches mènent donc à penser que l'activation du contrôle inhibiteur permet, lorsque la situation le requiert, d'exercer un contrôle sur la mobilisation des conceptions nécessaires pour fournir une réponse scientifiquement appropriée (Brault Foisy et al., 2015; Masson et al., 2014; Shtulman & Valcarcel, 2012). Le rôle du contrôle inhibiteur pour mobiliser des conceptions, des stratégies ou des modes de raisonnements appropriés a d'ailleurs été démontré dans plusieurs apprentissages scolaires, dont la logique (Houdé et al., 2000), la géométrie (Babai, Eidelman, & Stavy,

2012), l'arithmétique (Lubin, Vidal, Lanoë, Houdé, & Borst, 2013) et la grammaire (Lanoë, Vidal, Lubin, Houdé, & Borst, 2016).

### 1.6 Le problème et l'objectif de la recherche

Comme il a été mentionné précédemment, le développement de la culture scientifique représente non seulement un facteur de développement personnel et professionnel des individus, mais aussi un important levier de participation démocratique (Conseil des académies canadiennes, 2014; OCDE, 2007). L'apprentissage des concepts fondamentaux en sciences se retrouve au cœur du développement de la culture scientifique dans les sociétés industrialisées et par conséquent partie intégrante des programmes éducatifs nationaux. Or, plusieurs élèves éprouvent des difficultés à faire usage des concepts scientifiques. Pour ces élèves, l'apprentissage des sciences peut donc être difficile et les enseignants ont la responsabilité d'aider ces élèves à mieux apprendre les sciences. Depuis la fin des années 1970, les travaux en didactique des sciences ont permis de révéler que certaines des difficultés que les élèves rencontrent lors de l'apprentissage des concepts scientifiques sont associées à la persistance de conceptions spontanées incompatibles avec les connaissances scientifiques prévues dans les programmes scolaires. Les conceptions spontanées les plus fréquentes et les plus persistantes ont été identifiées et répertoriées (Driver, Squires, Rushworth, & Wood-Robinson, 2015; Wandersee et al., 1994).

Un nombre important de recherches ont porté sur les difficultés que pose la persistance des conceptions spontanées dans l'apprentissage des concepts scientifiques (p.ex. Confrey, 1990; Vosniadou, 2012; Wandersee et al., 1994). Des recherches ont par exemple montré que des adultes ayant poursuivi une formation scientifique spécialisée (experts) activent davantage que des adultes sans formation scientifique spécialisée (novices) le contrôle inhibiteur pour bloquer leurs conceptions spontanées et arriver à mobiliser les conceptions scientifiques, moins intuitives et automatiques (Brault Foisy

et al., 2015; Masson et al., 2014). Bien que prometteurs, les résultats de ces recherches portent sur des participants ayant différents niveaux de formation. Par conséquent, le problème de recherche est que le lien entre le contrôle inhibiteur et le fait que des élèves ayant pourtant profité d'une instruction scientifique comparable éprouvent à des degrés variables des difficultés conceptuelles en sciences demeure insuffisamment compris.

Certaines études se sont penchées sur des facteurs affectifs expliquant pourquoi certains élèves éprouvent plus de difficulté que d'autres à surmonter les difficultés que pose la persistance des conceptions spontanées (Sinatra & Mason, 2013). Néanmoins, peu de recherches se sont intéressées au lien entre les difficultés conceptuelles en sciences, c'est-à-dire la faible performance à des tâches de nature conceptuelle (p.ex. Conseil de la science et de la technologie, 2002), et le contrôle inhibiteur. L'objectif de cette recherche consiste à vérifier si les difficultés conceptuelles des élèves sont associées à une plus faible activation du contrôle inhibiteur. L'hypothèse générale de cette recherche est que les élèves ayant des difficultés conceptuelles activent moins que d'autres élèves ayant plus de facilité le contrôle inhibiteur. Des hypothèses de recherche spécifiques sont présentées à la fin du deuxième chapitre portant sur le cadre théorique.

Dans cette recherche, les élèves ayant des difficultés conceptuelles sont considérés comme ayant plus de difficulté à répondre de façon scientifique à des questions liées à des conceptions spontanées en sciences. Les difficultés conceptuelles tel qu'entendu dans cette recherche se rapportent donc à un contexte de mobilisation des conceptions, c'est-à-dire où il est requis d'évaluer la valeur de vérité scientifique d'énoncés portant sur des conceptions scientifiques ayant déjà fait l'objet d'un enseignement et non à un contexte d'acquisition ou d'apprentissage des conceptions. Les difficultés conceptuelles seraient attribuables, par hypothèse, à une moins grande capacité à mobiliser des conceptions scientifiques. À l'inverse, les élèves qui ont davantage de facilité à mobiliser les conceptions scientifiques obtiennent de meilleures performances

à des tâches de nature conceptuelle en sciences. Ces élèves ont davantage de facilité à répondre de façon scientifique à des questions liées à des conceptions spontanées en sciences et sont considérés comme ayant plus de facilité mobiliser les conceptions scientifiques. Les sections 2.1.3 et 2.1.4 approfondissent et précisent cette distinction.

En somme, les résultats de cette recherche pourraient contribuer à mieux comprendre le lien entre le contrôle inhibiteur et les difficultés conceptuelles. Ces difficultés apparaissent d'autant plus préoccupantes sachant qu'elles ont un impact sur le sentiment de compétence des élèves en sciences et donc aussi sur leur persévérance et leur réussite (Masnick, Valenti, Cox, & Osman, 2009; OCDE, 2008). Si les difficultés conceptuelles des élèves se trouvent effectivement associées à une sous-activation du contrôle inhibiteur, cela renforcerait l'idée selon laquelle les enseignants de sciences ont non seulement la responsabilité d'aider les élèves à apprendre les concepts scientifiques, mais également enseigner aux élèves à réaliser un contrôle actif de l'utilisation de leurs conceptions spontanées. Il pourrait éventuellement en découler des pistes pour d'éventuelles recherches sur les interventions pédagogiques à privilégier pour prévenir ces difficultés et mieux intervenir auprès des élèves.

## CHAPITRE II

### CADRE THÉORIQUE

Le deuxième chapitre de la thèse propose une synthèse des écrits sur le phénomène de la persistance des conceptions spontanées et les difficultés des élèves à mobiliser les conceptions scientifiques. Il tente de développer une hypothèse de recherche originale en s'inspirant de travaux en didactique des sciences, en psychologie cognitive ainsi qu'en neuroéducation.

Dans la première section du chapitre, le concept de conceptions spontanées, central à l'objectif de recherche, est défini. Puis, le problème de la persistance des conceptions spontanées en sciences est présenté selon deux perspectives, celle de l'acquisition des conceptions scientifiques et celle de la mobilisation des conceptions scientifiques. La deuxième section démontre ensuite comment la perspective de la mobilisation des conceptions ainsi que plusieurs résultats de recherche mènent à pressentir un lien entre le contrôle inhibiteur et les difficultés conceptuelles des élèves en sciences. Enfin, la troisième section propose une définition du deuxième concept clé de cette recherche, le contrôle inhibiteur et justifie le choix d'aborder l'étude du contrôle inhibiteur selon une approche neuroscientifique. La quatrième et dernière section énonce l'hypothèse de recherche.

## 2.1 Les conceptions spontanées

Comme il a été mentionné dans le premier chapitre, les élèves peuvent adhérer à des conceptions spontanées à l'égard de phénomènes naturels qui sont incompatibles avec les connaissances scientifiques prescrites dans les programmes scolaires. Sans les nommer dans ces termes, déjà Bachelard (1934) posait il y a plusieurs décennies le constat de l'existence des conceptions spontanées et les défis que certaines de ces conceptions représentent pour l'apprentissage des concepts scientifiques en affirmant que :

« (...) l'adolescent arrive dans la classe de Physique avec des connaissances empiriques déjà constituées : il s'agit alors non pas d'acquérir une culture expérimentale, mais bien de changer de culture expérimentale, de renverser les obstacles déjà amoncelés par la vie quotidienne. (p. 21–22)

Depuis les années 1970, de nombreuses recherches en didactique démontrent effectivement ce que Bachelard (1934) avait constaté de manière anecdotique, c'est-à-dire que les élèves adhèrent à des conceptions spontanées du monde construites pour rendre certains phénomènes naturels ou objets intelligibles (Confrey, 1990; Wandersee et al., 1994). Ces conceptions spontanées mènent parfois les élèves à formuler des réponses inappropriées dans un contexte scientifique (Chiu, Chou, & Liu, 2002; Confrey, 1990; Wandersee et al., 1994), et notamment dans le cas de questions conceptuelles, c'est-à-dire des questions de nature qualitative qui ne requièrent pas l'usage d'outils mathématiques.

### 2.1.1 Une définition

Les « conceptions » sont entendues dans cette recherche comme des manières de se représenter des phénomènes naturels. Elles s'apparentent en ce sens au concept de « représentations » dont certains auteurs font d'ailleurs usage pour décrire les

connaissances intuitives enracinées dans différents domaines de connaissances du monde qui nous entoure (Pozo & Gomez Crespo, 2005). Bien que minoritaires, certains didacticiens surtout issus de la francophonie (p.ex. Astolfi & Develay, 2002) utilisent le concept de représentations (plutôt que celui de conceptions) qu'ils ont repris du concept de représentation sociale issu du champ de la psychologie (Jodelet, 2003). Une représentation sociale est entendue de manière générale comme « (...) une façon de voir un aspect du monde, qui se traduit dans le jugement et dans l'action. » (Flament & Rouquette, 2003, p. 13) ou encore comme une construction spécifique du sujet, c'est-à-dire sa « version de la réalité » (Jodelet, 2003). Dans cette recherche, le terme « conception » est retenu afin de respecter les conventions et les traditions de recherche de la didactique des sciences, toutefois, le concept n'est pas hermétique et son sens est similaire à celui de « représentation ». Il ne faut donc pas y voir une opposition.

Les conceptions se distinguent toutefois des « croyances » qui réfèrent en sciences aux « pensées, prémisses ou assertions personnelles au sujet des objets ou phénomènes du monde matériel ou mental » (Hofer & Pintrich, 1997, p. 112, traduction libre). De plus, contrairement aux conceptions, l'étude des croyances implique nécessairement une forte composante émotionnelle et une prise en compte de l'expérience personnelle (Southerland, Sinatra, & Matthews, 2001).

Le concept de « conceptions » est interprété différemment selon les orientations théoriques adoptées par les didacticiens des sciences. La présente recherche adopte une vision utilitariste de la terminologie au sens où elle sert à identifier la désignation qui sert le mieux son objectif. La désignation devrait pouvoir mettre en relief le recours automatique des élèves aux conceptions et elle devrait pouvoir implicitement refléter l'écart par rapport aux conceptions scientifiques prescrites dans les programmes scolaires. L'appellation « conceptions spontanées » semble convenir à ces deux critères. La désignation de conceptions spontanées est notamment utilisée en sciences par Driver (1989) et en mathématiques par Cornu (1983). D'autres auteurs font usage

de concepts apparentés dont « épistémologie spontanée » (Désautels, Larochelle, & Gagné, 1993) et « raisonnement spontané » (Viennot, 1979). Ce dernier fait toutefois exclusivement référence à des types de raisonnement présents avant la scolarisation.

Dans cette recherche, l'appellation « conceptions spontanées » est définie comme l'ensemble des conceptions qui sont utilisées spontanément ou de manière automatique par les élèves et qui sont incompatibles avec les conceptions scientifiques enseignées. Une « conception spontanée » peut inclure, mais ne se limite pas à un ou une :

- « préconception » (Nussbaum & Novick, 1982) qui désigne une conception présente avant la scolarisation ou avant le contact formel avec la culture scientifique;
- « conception naïve » (Weller, 1995) qui insinue une certaine ignorance de l'élève et suppose que la conception doit être remédiée en raison de son caractère simpliste;
- « conception » ou « règle intuitive » (Stavy & Tirosh, 2000) qui réfère à des modes de pensée intuitifs automatiques, mais qui se restreint à des problèmes spécifiques de comparaison de grandeurs de volume, de masse, de température, etc.;
- « conception erronée » (Toussaint, 2002) qui met l'accent sur le caractère fautif et qui laisse entrevoir que ce soit la conception elle-même qui soit inappropriée alors que c'est parfois l'utilisation de la conception dans un contexte précis qui mène à formuler une réponse scientifiquement inappropriée;
- « conception fréquente » (Thouin, 1996) qui met l'accent sur le fait que la conception est souvent largement répandue et clairement identifiée dans la littérature scientifique;
- « conception d'élève » (Giordan & de Vecchi, 1987) qui insiste sur les conceptions auxquelles adhèrent les apprenants et les enfants d'âge scolaire;

- « conception alternative » (Planinic, Boone, Krsnik, & Beilfuss, 2006) qui dénote un certain décalage avec la conception scientifique, mais qui ne met pas l'accent sur le recours automatique à la conception.

### 2.1.2 Différentes perspectives sur la persistance des conceptions spontanées

Comme il en a été question au premier chapitre (voir section 1.3 et 1.4), les conceptions spontanées peuvent mener les élèves à formuler des réponses inappropriées dans un contexte scientifique. De plus, des études démontrent que ces conceptions persistent souvent même après des efforts de mémorisation, d'entraînement ou de renforcement (Confrey, 1990; Liu, 2001; Wandersee et al., 1994). En raison de la nature du problème de la persistance des conceptions spontanées, plusieurs recherches ont orienté leurs efforts davantage dans une approche constructiviste plutôt que behavioriste de l'apprentissage. Conséquemment, elles ont envisagé les nouveaux savoirs comme étant construits à partir des connaissances antérieures de l'apprenant (p.ex. Posner et al., 1982). Ces travaux ont donné naissance au champ de recherche du changement conceptuel qui concentre ses efforts à identifier les conceptions spontanées et à mieux comprendre comment celles-ci changent, se modifient ou s'adaptent. Les processus par lesquels les élèves arrivent à faire modifier leurs conceptions ont été largement modélisés, et ce, dans de nombreux domaines scientifiques (p.ex. Vosniadou, 2008) à ce point qu'aucun modèle ne soit largement accepté et suffisamment validé pour faire consensus (diSessa, 2006).

L'absence de consensus provient non seulement de la grande variété des positions théoriques des chercheurs, mais aussi de la diversité des centres d'intérêt des recherches sur les conceptions spontanées des élèves. Alors que l'ensemble des travaux partage une préoccupation commune à l'égard de la persistance des conceptions spontanées, il est possible de distinguer entre deux types de modèles. Certains d'entre

eux s'intéressent davantage à l'acquisition des conceptions scientifiques, c'est-à-dire à expliquer les processus par lesquels la structure cognitive initiale (les conceptions spontanées) est restructurée pour acquérir la conception scientifique. D'autres modèles s'attardent plus à la mobilisation des conceptions, c'est-à-dire le développement d'une capacité à sélectionner puis utiliser les conceptions scientifiques dans les contextes appropriés, dans la mesure où elles coexistent avec les conceptions spontanées.

Les prochaines sous-sections visent à présenter les contributions respectives de ces deux perspectives ainsi qu'à justifier le choix d'ancrer l'hypothèse de cette recherche dans la perspective de la mobilisation des conceptions. Celle-ci concerne plus spécifiquement les mécanismes par lesquels se fait la sélection ainsi que l'utilisation des conceptions et non les caractéristiques inhérentes des conceptions qui rendent difficile leur acquisition. Les travaux présentés ont conséquemment une orientation psychologique, c'est-à-dire qu'ils tentent de déterminer les processus cognitifs associés à la mobilisation des conceptions.

Toutefois, il est important de souligner que la distinction entre les perspectives d'acquisition et de mobilisation des conceptions n'est pas sans limites. La typologie en deux catégories se veut un outil théorique pour poser l'hypothèse de recherche, mais ne prétend pas à l'exhaustivité. Certains travaux pourraient ne pas trouver leur place dans cette dichotomie. C'est notamment le cas de l'étude de Nussbaum et Novick (1982) qui s'inscrit davantage dans la lignée des modèles pédagogiques, et non psychologiques, et par conséquent elle présente des moyens d'enseignement, mais ne contribue pas directement à la compréhension des difficultés d'acquisition ou de mobilisation des conceptions scientifiques.

### 2.1.3 La perspective de l'acquisition des conceptions

Plusieurs travaux partagent une perspective commune qui réside dans l'idée que les conceptions spontanées sont persistantes, car les conceptions scientifiques sont difficiles à acquérir ou à apprendre. Les travaux menés dans cette perspective s'inscrivent en continuité avec le courant constructiviste (Smith, diSessa, & Roschelle, 1993). Ils ont tenté de montrer comment il est possible pour l'élève de construire sa compréhension des conceptions scientifiques, de manière graduelle et à partir des éléments existants de sa structure cognitive de départ. Ils s'efforcent donc de décrire la nature des conceptions et les processus par lesquels la structure cognitive initiale (les conceptions spontanées) est restructurée pour acquérir les conceptions scientifiques. L'idée de difficultés d'acquisition des conceptions est implicite à celle de restructuration. Le centre d'intérêt concerne donc les difficultés d'acquisition de certaines conceptions scientifiques (p.ex. l'accélération gravitationnelle). Les travaux de trois chercheurs sont présentés ci-dessous dans le but d'illustrer comment la persistance des conceptions spontanées est expliquée dans cette perspective.

#### 2.1.3.1 Le changement de catégorie ontologique (Chi, 1992; Chi & Slotta, 1993)

Pour Chi (1992; Chi & Slotta, 1993), les conceptions spontanées persistent, car pour acquérir les conceptions scientifiques l'élève doit avoir recours à une ontologie ou une modélisation différente, c'est-à-dire réattribuer un concept d'une catégorie ontologique erronée vers une catégorie ontologique appropriée. Ce changement de catégorie peut par exemple survenir lorsque le concept de chaleur est spontanément attribué à la catégorie ontologique d'objet alors qu'il est scientifiquement attribué à la catégorie des processus de transfert d'énergie. Chi (1992) distingue deux formes de réattribution d'un concept à une nouvelle catégorie ontologique, l'une dite faible et l'autre dite radicale. Apprendre qu'une baleine allaite ses petits mène à réattribuer le concept de baleine de la catégorie des poissons (conception spontanée) à celle des mammifères (conception scientifique). Cette réattribution est qualifiée de faible, car bien que la

baleine se voit réattribuer les attributs de poissons, elle conserve néanmoins les attributs des êtres vivants auxquels les catégories de poissons et de mammifères sont subordonnées. Toutefois, le processus de réattribution expliqué plus haut qui réattribue la chaleur à la catégorie des processus est dit radical, car la matière et les processus n'ont pas d'attributs communs. Selon Chi (1992), l'acquisition des conceptions scientifiques est difficile puisqu'elle suppose de faire passer les concepts d'une catégorie ontologique erronée à une catégorie ontologique appropriée par un processus de réattribution, par exemple dans la conception spontanée « chaleur = objet », la chaleur doit être réattribuée en « chaleur = processus » pour être transformée en conception scientifique. En somme, pour Chi (1992), l'acquisition des conceptions scientifiques peut être difficile lorsqu'elle doit passer par une restructuration des conceptions.

#### 2.1.3.2 La coordination du savoir intuitif (diSessa, 1993, 2008)

diSessa (1993, 2008) attribue dans son cas les difficultés d'acquisition des conceptions scientifiques à l'utilisation inadéquate de structures conceptuelles. Ces structures seraient composées d'éléments simples et morcelés, les primitives phénoménologiques (*p-prims*), qui émanent d'une association superficielle entre différents aspects de phénomènes naturels. Les *p-prims* peuvent être conçues comme des relations causales intuitives entre qualités ou quantités, par exemple, « davantage d'efforts vise à compenser une résistance accrue (*working harder*) ». L'usage de cette *p-prim* peut être observé lorsqu'un élève a l'impression qu'un aspirateur obstrué est bruyant, car il « travaille plus fort » alors que scientifiquement, le bruit s'explique par le fait que le moteur, n'ayant pas à produire une différence de pression, tourne à vide (diSessa, 1993, p. 219). L'apprentissage passe donc par l'agencement et l'intégration de ces unités éparses (*p-prims*) en classes de coordination ou en d'autres mots, par la coordination du savoir intuitif. Ainsi, pour diSessa (1993), l'acquisition d'une conception scientifique repose sur une modification de l'utilisation de *p-prims*. Au cours de ce

processus, l'élève apprend à coordonner ses associations superficielles et surtout à les assigner aux aspects appropriés du phénomène de manière à rejoindre ce que propose la conception scientifique. En somme, pour diSessa (1993), les conceptions spontanées persistent, car, pour acquérir les conceptions scientifiques, l'élève doit réaliser une transition entre une utilisation naïve et une utilisation plus systématique des *p-prims* où les éléments sont organisés en accordance avec les conceptions scientifiques.

### 2.1.3.3 La réorganisation des théories-cadres (Vosniadou, 1994, 2002)

Les travaux de Vosniadou (1994, 2002) se sont également intéressés aux difficultés d'acquisition de certaines conceptions scientifiques. Ils défendent l'idée que les structures sous-jacentes aux conceptions spontanées des élèves sont constituées d'éléments organisés et cohérents. Acquérir une conception scientifique suppose donc que des éléments à la base des conceptions spontanées des élèves soient restructurés. Par exemple, un élève peut, à partir de ses observations quotidiennes, en arriver à se construire un modèle mental selon lequel la Terre est un disque plat, et ce, à partir d'une théorie-cadre voulant que la gravité ne s'exerce que vers le bas, elle-même formée de présuppositions fondamentales comme « les objets physiques sont soit animés ou inanimés ». Les conceptions spontanées des élèves seraient ainsi des interprétations de faits scientifiques à partir de théories-cadres erronées qui résultent en des modèles mentaux construits sur mesure et de façon temporaire. La difficulté dans l'acquisition d'une conception scientifique réside dans le fait que l'élève doit réviser la source de ces modèles mentaux, soit ses théories-cadres. Dans l'exemple ci-haut, modifier une conception spontanée requiert de réviser la théorie-cadre selon laquelle la gravité est dirigée vers le bas et qui peut être constituée à partir de perceptions sensorielles dès la petite enfance. L'acquisition des conceptions scientifiques est donc un processus lent et graduel qui nécessite que progressivement se réorganisent les théories-cadres existantes. En somme, pour Vosniadou (1994, 2002), les conceptions spontanées

persistent, car pour acquérir les conceptions scientifiques, l'élève doit réorganiser en profondeur les structures sous-jacentes à ses conceptions spontanées.

En résumé, certains travaux portent sur l'acquisition des conceptions scientifiques et ils montrent en quoi il est difficile pour l'élève de se construire la conception scientifique elle-même. Pour Chi (1992), la difficulté d'acquisition des conceptions scientifiques réside dans le fait que développer une conception scientifique nécessite de réassigner un concept à une catégorie ontologique différente, alors que pour diSessa (1993), l'acquisition des conceptions scientifique suppose que l'élève coordonne différemment les relations causales intuitives (*p-prims*). Enfin, pour Vosniadou (1994), l'acquisition des conceptions scientifiques est un processus difficile puisqu'il nécessite que progressivement se réorganisent les théories-cadres existantes.

#### 2.1.4 La perspective de la mobilisation des conceptions

Alors que les travaux inscrits dans la perspective d'acquisition des conceptions se sont surtout intéressés par les facteurs qui expliquent pourquoi il est difficile d'acquérir certaines conceptions scientifiques, d'autres recherches se sont plutôt inscrites dans une perspective de mobilisation des conceptions. Pour ces travaux, le centre d'intérêt concerne davantage les difficultés à faire coexister les conceptions spontanées et scientifiques d'une manière appropriée au regard de l'éducation scientifique, c'est-à-dire qui permet une mobilisation de la conception scientifique dans les contextes où elle est attendue (p.ex. Bélanger, 2008; Mortimer, 1995; Ohlsson, 2009; Potvin & Cyr, 2017; Solomon, 1983).

Il est intéressant de noter qu'avant même le développement de cette perspective de recherche, le philosophe des sciences Gaston Bachelard avait insinué l'idée d'une

coexistence entre les conceptions spontanées et scientifiques<sup>2</sup> en proposant l'existence de profils épistémologiques. Pour Bachelard (1940), chacun des concepts scientifiques possède plusieurs niveaux. Par exemple, le concept de masse possède notamment un niveau réaliste naïf où il est conçu comme une « appréciation quantitative grossière » (un objet très petit n'aura pas de masse) ainsi qu'un niveau empiriste où la masse est conçue comme la valeur qu'indique une balance. L'ensemble des fréquences d'utilisation de chacun des niveaux chez un élève constitue son profil épistémologique. Dans l'exemple ci-dessus, l'utilisation du niveau réaliste naïf correspondrait à une conception spontanée de la masse alors que le niveau empiriste correspondrait à une conception scientifique de la masse telle qu'elle est prescrite dans les programmes scolaires.

Les travaux menés dans cette perspective de mobilisation des conceptions ont tenté de montrer comment les conceptions scientifiques enseignées peuvent cohabiter avec les conceptions spontanées déjà présentes générant des systèmes explicatifs différents, concurrents et complémentaires (Bélanger, 2008). Ils s'efforcent donc de décrire, d'une manière opérationnelle, comment les élèves en viennent à mobiliser les conceptions scientifiques dans les contextes appropriés. Les travaux de cinq chercheurs sont présentés ici dans le but d'illustrer comment la persistance des conceptions spontanées est expliquée dans une perspective de mobilisation des conceptions. L'intention n'est pas de réaliser une recension exhaustive de ces travaux, mais plutôt de donner une image des composantes de cette perspective afin d'y positionner cette recherche (voir section 2.1.5). L'intention dans cette section est donc de mettre à l'avant-plan la question de la mobilisation des conceptions.

---

<sup>2</sup> Voir les travaux sur les profils conceptuels (Mortimer, 1995; Mortimer & El-Hani, 2014)

#### 2.1.4.1 Les « manières particulières de voir le monde » (Solomon, 1983)

Solomon (1983) formule déjà dans les années 1980 l'idée de la coexistence des conceptions spontanées et scientifiques. Pour Solomon (1983) les conceptions spontanées sont des « conceptions ordinaires » qui sont mobilisées par défaut et constamment renforcées par les interactions sociales, le sens commun, les médias, etc. Il peut donc même arriver à des scientifiques experts de mobiliser ces conceptions spontanées lorsqu'ils demandent par exemple à un collègue de fermer la porte pour ne pas « laisser entrer le froid » ou encore d'affirmer qu'ils ont « jeté un coup d'oeil » sur un document donné bien que ces énoncés soient inappropriés dans le contexte scientifique.

Les conceptions scientifiques, quant à elles, ne bénéficient pas de ce renforcement presque quotidien et il en résulte une asymétrie entre les deux mondes : il est plus difficile d'accéder au monde scientifique qu'au monde ordinaire. Les conceptions scientifiques ne sont donc pas mobilisées spontanément et elles nécessitent selon Solomon (1983) un signal d'entrée en scène (*cue*), ou marqueur contextuel, qui peut prendre la forme d'une expression scientifique utilisée dans une question. Par exemple, un élève à qui l'on demande de définir le transfert d'énergie thermique qui se produit lorsqu'on ouvre la porte en hiver a peu de chance d'utiliser la conception ordinaire ou spontanée selon laquelle « le froid existe comme substance » puisque la question contient un signal, l'utilisation de l'expression « transfert d'énergie thermique » qui aide l'élève à mobiliser la conception scientifique. La persistance des conceptions spontanées est donc, dans ce modèle, naturelle puisque les conceptions conservent leur contexte de validité, la vie quotidienne, même après un enseignement formel des conceptions scientifiques.

Pour Solomon (1983), apprendre à mobiliser les conceptions scientifiques passe par la compréhension de la différence entre la pensée quotidienne et la pensée scientifique.

Dans ce contexte l'enseignant serait responsable d'aider les élèves à apprécier si les conceptions, des « manières particulières de voir le monde », sont appropriées dans des contextes spécifiques. En somme, pour Solomon (1983), les conceptions spontanées persistent souvent, car pour mobiliser les conceptions scientifiques, l'élève doit apprendre à distinguer les contextes de validité de chaque type de conception, notamment en prenant appui sur des marqueurs contextuels (*cues*) qui l'aident à distinguer dans quel contexte, ou manière particulière de voir le monde, il se trouve.

#### 2.1.4.2 Les profils conceptuels (Mortimer, 1995; Mortimer & El-Hani, 2014)

En s'inspirant des profils épistémologiques de Bachelard (1940), Mortimer (Mortimer, 1995; Mortimer & El-Hani, 2014) propose d'envisager la mobilisation des conceptions comme relevant du profil conceptuel de l'élève basé notamment sur les expériences et la culture. Pour chaque concept scientifique, les élèves possèderaient un profil constitué de différentes zones. Par exemple, pour le concept d'atome, la zone réaliste du profil comporte une conception selon laquelle la matière est continue et où il n'existe pas de vide. Dans la zone substantialiste, la conception de l'atome suppose l'existence de particules, perçues comme des grains de matière. Enfin, dans la zone classique du profil conceptuel, l'atome est conçu comme l'unité de base de la matière qui est conservée lors des transformations chimiques et le rapprochement avec l'atome comme modèle scientifique apparaît. Alors que certaines zones d'un profil conceptuel reflètent des conceptions spontanées, d'autres réfèrent à des conceptions scientifiques, ce qui laisse entendre qu'un certain mécanisme de mobilisation se développe. Différentes zones du profil peuvent être sollicitées dépendamment du contexte dans lequel se trouve l'élève.

Selon Mortimer (Mortimer, 1995; Mortimer & El-Hani, 2014), pour mobiliser une conception scientifique plutôt qu'une conception spontanée, l'élève doit modifier son profil conceptuel. Pour ce faire, il doit d'abord prendre conscience des différentes zones du profil et ensuite ajouter les zones pertinentes. L'élève doit ensuite apprendre à

comparer les différentes zones du profil afin d'en évaluer leurs portées respectives et ainsi mobiliser une conception plutôt qu'une autre. En somme, pour Mortimer (Mortimer, 1995; Mortimer & El-Hani, 2014), les conceptions spontanées persistent souvent, car pour mobiliser les conceptions scientifiques, l'élève doit développer une conscience des limites des zones au sein de son profil conceptuel et ainsi devenir capable de mobiliser la conception la plus appropriée dans un contexte scientifique.

#### 2.1.4.3 La complexification conceptuelle (Bélanger, 2008)

Tout comme Mortimer (1995) et Solomon (1983), Bélanger (2008) défend l'idée que la difficulté dans la mobilisation des conceptions scientifiques proviendrait du fait que les conceptions spontanées et scientifiques font toutes deux partie des possibilités conceptuelles disponibles à l'élève et qu'elles peuvent être appropriées dans leurs contextes respectifs. Selon Bélanger (2008), deux systèmes explicatifs différents, concurrents et complémentaires peuvent cohabiter au sein des structures cognitives d'un individu puisque les conceptions scientifiques apprises en contexte scolaire se développent de façon plus ou moins indépendante des conceptions spontanées.

Or, l'originalité des travaux de Bélanger (2008) réside dans l'idée que les conceptions des élèves ne sont pas isolées au sein de la structure cognitive, mais seraient plutôt progressivement intégrées par diverses structures intermédiaires qui formeraient chez les experts un complexe. Les structures intermédiaires regroupées en cinq types permettraient de gérer la multiplicité des conceptions spontanées et scientifiques : descriptives, évaluatives, explicatives, transformatives et décisionnelles. La mobilisation des conceptions, dans un contexte donné, reposerait sur les structures décisionnelles qui procéderaient soit de « (...) façon associative, basé sur la reconnaissance de signaux, (...) ou d'une façon délibérée, basée sur un travail d'évaluation (...) » (2008, p. 183). L'activation par signaux peut être basée sur la détection de signaux terminologique (p.ex. Maloney & Siegler, 1993; Solomon, 1983)

tels les mots employés ou encore conceptuels et sociologiques (p.ex Larochelle & Désautels, 1992) comme le langage ou la façon d'être. Ceux-ci contribueraient à orienter l'élève dans la mobilisation de la conception parmi son répertoire de possibilités conceptuelles. Le second mécanisme d'activation serait plus délibéré et basé sur les ressources conceptuelles. Dans ce cas, la mobilisation de la conception la plus appropriée se fait au regard de la situation ou du contexte, par exemple répondre à un questionnaire de connaissances scientifiques. En somme, pour Bélanger (2008), les conceptions spontanées persistent, car pour mobiliser des conceptions appropriées (scientifiques), l'élève doit fournir un effort important d'évaluation de ses possibilités conceptuelles.

#### 2.1.4.4 La « réassociation » des théories informelles (Ohlsson, 2009)

Pour Ohlsson (2009), la persistance des conceptions spontanées des élèves s'explique par le fait qu'au cours de l'apprentissage « normal », l'élève développe, en parallèle des conceptions scientifiques, des théories informelles provenant de divers domaines d'expérience qui ont une portée locale et immédiate, mais sans lien réel avec les connaissances scientifiques prescrites dans les programmes scolaires. Les élèves développent par exemple des théories sur l'évolution de la musique populaire ou les facteurs qui affectent la durabilité des chaussures, etc. À long terme, il en résulte un réseau de croyances et de conceptions spontanées, élaboré pour répondre à des problèmes courants.

Pour développer une conception scientifique, l'élève doit réassocier un phénomène à une théorie qui, à l'origine, n'était pas nécessairement destinée à l'expliquer. Par exemple, un élève peut, en jouant à *Game of Life* (Sigmund, 1993), développer une conception scientifique des mécanismes de sélection naturelle d'un phénomène virtuel où des centaines de générations de cellules évoluent dans le contexte d'un jeu vidéo. Pour arriver à mobiliser une conception scientifique dans le contexte du phénomène

réel, celui de l'évolution des espèces, l'élève doit réassocier la théorie de la sélection naturelle à ce nouveau phénomène. Les difficultés dans la mobilisation des conceptions scientifiques sont pour Ohlsson (2009) l'effet secondaire d'une course entre les différentes conceptions pour expliquer au mieux les expériences personnelles et le discours scientifique d'un individu. Les élèves ont spontanément tendance à mobiliser la conception spontanée puisqu'elle a souvent le plus grand pouvoir explicatif, par conséquent, la mobilisation d'une conception scientifique repose sur l'instauration d'une vigilance quant à l'association entre les conceptions spontanées ou « théories informelles » et différents phénomènes. En somme, pour Ohlsson (2009), les conceptions spontanées persistent souvent, car la mobilisation des conceptions scientifiques repose sur une « évaluation compétitive » où les conceptions spontanées prédominent en raison de leur plus grand pouvoir explicatif.

#### 2.1.4.5 La prévalence des conceptions (Potvin, 2013)

En s'appuyant sur des travaux de ces prédécesseurs (Mortimer, 1995; Ohlsson, 2009; Solomon, 1983), Potvin (2013) propose une approche basée sur la prévalence qui vise intégrer les résultats de recherches en neuroimagerie (Brault Foisy et al., 2015; Dunbar & Stein, 2007; Masson et al., 2014) et en psychologie cognitive (p.ex. Lombrozo, Kelemen, & Zaitchik, 2007; Shtulman & Valcarcel, 2012; Zaitchik & Solomon, 2008) qui tendent à démontrer que les conceptions spontanées interfèrent dans la production de réponses scientifiquement appropriées même après des années de scolarisation et même chez des experts en sciences. Bien que Potvin (2013) élabore un modèle principalement pédagogique, il y défend aussi, comme le fait Ohlsson (2009), l'idée que la mobilisation d'une conception repose sur un processus « compétitif » entre les conceptions spontanées et scientifiques. Les conceptions spontanées, étant plus familières, bénéficieraient d'une « longueur d'avance » dans la course puisque notre système cognitif aurait une tendance naturelle à attribuer plus de valeur aux éléments

connus (Gigerenzer & Goldstein, 1996). Pour Potvin (2013), il est donc difficile de mobiliser les conceptions scientifiques, car elles sont moins renforcées, donc prévalent moins. En somme, les conceptions spontanées persistent souvent, car mobiliser les conceptions scientifiques appropriées nécessiterait l'instauration d'un contrôle des conceptions que l'élève peut par exemple activer lorsqu'il est placé devant une alerte qui indique la présence d'un piège.

En résumé, pour Solomon (1983), la mobilisation des conceptions scientifiques est difficile, car les conceptions spontanées sont légitimes et efficaces dans plusieurs contextes. Pour Mortimer (1995) la difficulté est liée aux contextes d'apprentissage où les élèves développent différents profils conceptuels qui coexistent pour un même concept scientifique. Pour Bélanger (2008), la difficulté à mobiliser les conceptions scientifiques proviendrait de l'effort important nécessaire pour évaluer les différentes possibilités conceptuelles disponibles à l'élève. Quant à Ohlsson (2009), il propose que la difficulté provienne du fait que les conceptions spontanées ou « théories informelles » ont souvent un plus grand pouvoir explicatif. Enfin, Potvin (2013) défend l'idée que la mobilisation des conceptions scientifiques est difficile, car elle nécessiterait l'instauration d'un contrôle des conceptions spontanées qui prévalent, c'est-à-dire auxquelles les élèves ont tendance à attribuer plus de valeur. Ces travaux partagent donc tous un point commun. Ils proposent d'expliquer en partie la persistance des conceptions spontanées par les difficultés à faire coexister les conceptions spontanées et scientifiques d'une manière appropriée au regard des attentes des programmes scolaires en sciences.

### 2.1.5 Le positionnement de la recherche

Les perspectives d'acquisition et de mobilisation des conceptions expliquent différents aspects du problème de la persistance des conceptions spontanées. Dans les travaux dont le centre d'intérêt est l'acquisition des conceptions, la persistance des conceptions

spontanées relève davantage d'aspects intrinsèques aux conceptions scientifiques qui les rendent difficiles à acquérir ou à apprendre. Ces travaux mettent davantage l'accent sur les différences épistémologiques entre conceptions spontanées et scientifiques, c'est-à-dire les différences de contenu et structures entre les conceptions spontanées des élèves et les conceptions scientifiques enseignées. Par conséquent, ils portent généralement sur des contenus disciplinaires spécifiques. Les travaux de diSessa (1993, 2008) expliquent la transition de la physique naïve à la physique newtonienne alors que Vosniadou (1994, 2002) décrit l'apprentissage de concepts en astronomie dont le cycle jour-nuit et la structure de la Terre.

La présente recherche s'inscrit plutôt dans la seconde perspective qui s'intéresse quant à elle aux mécanismes associés à la mobilisation des conceptions. Dans ces travaux, la persistance des conceptions spontanées relève davantage d'une difficulté à faire coexister les conceptions spontanées et scientifiques de manière appropriée du point de vue scolaire. Les chercheurs inscrits dans cette perspective font généralement consensus à l'effet que les conceptions spontanées sont plus facilement accessibles que les conceptions scientifiques et qu'elles peuvent mener dans certains cas à des réponses scientifiquement inappropriées si les élèves ne parviennent pas à les contrôler. Les recherches suggèrent donc que, pour mobiliser les conceptions scientifiques, il faille avoir recours à une manière de raisonner qui soit plus complexe, possiblement un contrôle plus important des modes de pensée qui devrait s'observer empiriquement. Plusieurs études suggèrent que cette forme de raisonnement implique le contrôle inhibiteur, c'est-à-dire le contrôle ou le blocage des réponses ou de stratégies de pensée spontanées. La présentation de ces recherches fait l'objet de la prochaine section.

## 2.2 Le lien entre les difficultés à mobiliser les conceptions et le contrôle inhibiteur

Dans la section qui suit, l'idée de « mobilisation » des conceptions est précisée et des recherches sont présentées afin de démontrer comment les élèves peuvent éprouver des

difficultés à mobiliser les conceptions scientifiques. Ensuite, des recherches portant sur le lien entre ces difficultés et le contrôle inhibiteur sont présentées et leurs limites sont discutées afin de démontrer les lacunes dans l'état actuel des connaissances.

### 2.2.1 Les difficultés à mobiliser les conceptions

Comme il a été mentionné au premier chapitre, les difficultés conceptuelles s'observent par la faible performance à des tâches de nature conceptuelle en science (p.ex. Conseil de la science et de la technologie, 2002) et elles seraient attribuables, par hypothèse, à une moins grande capacité à mobiliser les conceptions scientifiques. Les sections 2.1.3 et 2.1.4 ont permis de distinguer les difficultés associées à l'acquisition des conceptions scientifiques des difficultés associées à la mobilisation des conceptions scientifiques. Les difficultés d'acquisition concernent davantage les différences entre la structure cognitive initiale de l'élève (ses conceptions spontanées) et la structure des conceptions scientifiques. Les mécanismes d'acquisition d'une conception scientifique du phénomène de chaleur ont par exemple été attribués par Chi (1992) au recours à une ontologie ou une modélisation différente. Les travaux menés sur les mécanismes d'acquisition des conceptions s'intéressent donc aux processus par lesquels les élèves comprennent les conceptions scientifiques, c'est-à-dire comme ils apprennent à maîtriser ou acquérir un contenu donné.

Quant aux difficultés de mobilisation des conceptions, elles se rapportent quant à elles non pas à un contexte d'apprentissage, mais à un contexte d'évaluation de la valeur de vérité scientifique. D'abord, il est important de souligner que dans cette recherche, l'usage du terme « mobilisation » n'est pas synonyme de décision. La décision est un jugement que l'élève porte sur la nature de la tâche à réaliser. Le processus décisionnel peut notamment être basé sur la reconnaissance de signaux comme la présence de marqueurs contextuels (*cues*) (Solomon, 1983) pour déterminer dans quel « monde de connaissances » l'élève se trouve. La décision peut aussi reposer sur des indices

épistémologiques qui contribuent à identifier le jeu de la connaissance pertinent à une situation (Larochelle & Désautels, 1992). Comme le souligne Bélanger (2008), dans le contexte d'un examen ou de la tâche cognitive de cette recherche (voir section 3.2.2), il est clair pour l'élève que les exigences requièrent de répondre à l'aide de conceptions scientifiques. D'abord, des signaux sont présents : les questions posées sont semblables à celles abordées dans les cours de sciences et les énoncés contiennent des termes clairement scientifiques. L'élève n'a donc pas à enclencher un processus de décision par rapport au type de conceptions, spontanées ou scientifiques, à utiliser. Ce qui est vérifié dans cette recherche est donc spécifiquement la capacité à mobiliser les conceptions<sup>3</sup>, c'est-à-dire faire un choix d'une conception qui respecte au mieux les attentes communiquées au niveau « des degrés de précision, de rapidité de calcul, etc. » (2008, p. 187). La sélection ou le choix résulte alors d'une analyse coûts-bénéfices [selon l'expression de Rohr et Reiman cités dans Bélanger (2008)] entre différentes options, dans le cas présent, de différentes conceptions. Cette idée d'une analyse coûts-bénéfices s'apparente à ce qu'Ohlsson (2009) et Potvin (2013) qualifient respectivement d'« évaluation compétitive » et de « course » qui consiste à choisir la conception qui possède la plus grande « utilité cognitive », c'est-à-dire la capacité à fournir une explication ou une prédiction juste dans une situation donnée. Plusieurs études démontrent comment les élèves peuvent éprouver des difficultés à opérer cette mobilisation. La thèse n'a pas pour objectif de modéliser ces difficultés comme l'ont fait par exemple Linder (1993) ou Pozo et Gomez Crespo (2005). Elle vise plutôt à vérifier l'existence d'une relation entre le contrôle inhibiteur et les difficultés à mobiliser les conceptions scientifiques.

Une étude montre par exemple que les élèves peuvent avoir des difficultés à mobiliser une conception scientifique associée aux caractéristiques du vivant (Babai, Sekal, &

---

<sup>3</sup> Il s'agit de « l'activation des ressources conceptuelles » selon la terminologie de Bélanger (2008)

Stavy, 2010). Dans cette recherche, les élèves de 15-16 ans étaient invités à classer parmi les vivants ou les non-vivants des images montrant des items soit : 1) mobiles et vivants (p.ex. oiseau); 2) immobiles et vivants (p.ex. arbre); 3) mobiles et non-vivants (p.ex. voiture) et 4) immobiles et non-vivants (p.ex. marteau). Les résultats démontrent que les élèves, bien qu'ayant suivi un cours de biologie, éprouvaient plus de difficulté à classer des items mobiles dans la catégorie non-vivant. Les élèves se sont effectivement montrés plus lents et moins performants lorsqu'ils devaient classer des items comme une voiture ou un astre parmi les non-vivants. Ces résultats suggèrent qu'ils ont de la difficulté à mobiliser une conception scientifique des caractéristiques du vivant selon laquelle le vivant doit, par exemple, « être composé de cellules » ou « se reproduire de manière autonome ». Il semble donc que la conception spontanée « ce qui bouge est vivant », qui est largement répandue chez les enfants d'âge préscolaire, entre en compétition avec la conception scientifique du vivant même après un apprentissage de la conception scientifique.

Keleman et Rosset (2009) ont également observé des difficultés à mobiliser les conceptions scientifiques, mais cette fois chez des étudiants de niveau universitaires. Une centaine d'étudiants dont le cursus académique incluait une formation scientifique ont été invités à juger de l'exactitude d'explications de phénomènes naturels. Certaines des explications étaient de type « test », car elles impliquaient une conception téléologique (une forme de conceptions spontanées) qui menait à une réponse scientifiquement inappropriée alors que d'autres étaient de type « contrôle » puisque les explications scientifiques et spontanées étaient toutes deux appropriées dans un contexte scientifique. Les participants ont été répartis en trois groupes, le premier groupe devait répondre très rapidement, le deuxième groupe assez rapidement et la vitesse n'était pas contrôlée dans le troisième groupe. Les chercheurs ont analysé les réponses des étudiants des trois groupes afin de vérifier s'ils avaient des difficultés à mobiliser les conceptions scientifiques, entre d'autres mots s'ils adhéraient davantage à des explications de nature téléologiques ou spontanées.

Les résultats montrent que lorsqu'ils doivent répondre très rapidement, les participants avaient davantage de difficulté à mobiliser les conceptions scientifiques dans les énoncés « test ». En effet, ils étaient plus nombreux à plutôt mobiliser une explication téléologique voulant que certaines roches soient pointues pour ne pas que les animaux s'y assoient. Aucune différence n'a été observée entre les groupes pour les énoncés « contrôle », même dans le groupe qui disposait du très court laps de temps. Ces résultats appuient l'hypothèse selon laquelle les adultes éprouvent toujours des difficultés à mobiliser des conceptions scientifiques plutôt que spontanées dans le contexte d'explications téléologiques. En effet, il semble que lorsqu'ils sont privés du temps nécessaire afin d'opérer cette mobilisation, ils ont davantage recours aux conceptions spontanées ou téléologiques utilisées principalement par les enfants pour fournir des explications à des phénomènes naturels.

Une recherche similaire a été réalisée auprès de 80 scientifiques professionnels à qui les chercheurs ont demandé d'évaluer l'exactitude d'explications de phénomènes naturels (Kelemen et al., 2012). La moitié d'entre eux disposaient d'un temps de réponse limité alors que l'autre moitié n'avait aucune limite de temps. Les résultats montrent que les participants ayant accès à des ressources cognitives limitées, c'est-à-dire qui devaient répondre rapidement, avaient plus de difficulté à mobiliser les conceptions scientifiques et avaient plus souvent recours à des explications téléologiques. Il semble donc que même des individus ayant reçu une formation scientifique poussée et possédant un important bagage de connaissances peuvent avoir des difficultés à mobiliser des conceptions scientifiques.

Legare, Evans, Rosengren et Harris (2012) ont quant à eux comparé les réactions d'enfants et d'adultes face à des justifications naturelles ou surnaturelles (spontanées) de phénomènes quotidiens. En psychologie du développement, des auteurs soutiennent que les enfants abandonnent graduellement leur croyance dans les causes surnaturelles

au profit d'une pensée plus objective, rationnelle et scientifique des causes et de leurs effets (Harris, 2009; Piaget, 1928). Or, dans leur recension des écrits, Legare et al. (2012) ont observé qu'à quelques exceptions près, les adultes comme les enfants mobilisent de manière complémentaire des explications naturelles, qui s'apparentent à des conceptions scientifiques, et surnaturelles, qui s'apparentent à des conceptions spontanées mettant en jeu des éléments culturels, pour expliquer des phénomènes dont l'origine des espèces, la maladie et la mort. Par exemple, certains adultes affirmaient qu'« une sorcière peut vous mettre en contact avec des virus et des bactéries » (Legare et al., 2012, p. 783) pour expliquer la propagation de maladies. D'autres disaient que « c'est possiblement la sorcellerie et les relations sexuelles non protégées » (2012, p. 783) qui peuvent être en cause dans la transmission du VIH. Ces explications traduisent une mobilisation partielle des conceptions scientifiques. Il semble donc que les conceptions spontanées, dans ce cas-ci surnaturelles, persistent et rendent difficile la mobilisation des conceptions scientifiques appropriées.

Les recherches présentées jusqu'ici mettent en évidence la persistance des conceptions spontanées et la difficulté de mobiliser les conceptions scientifiques appropriées. Toutefois, elles concernent des concepts scientifiques relativement précis comme le vivant, l'évolution ou la maladie. Shtulman et Valcarcel (2012) ont tenté de répliquer ces résultats à un ensemble plus large de concepts scientifiques. Dans cette étude, les chercheurs ont demandé à 150 étudiants universitaires ayant suivi en moyenne trois cours de sciences de niveau collégial de vérifier l'exactitude d'énoncés relatifs à des phénomènes naturels. Ces énoncés étaient soit de type « congruent », ce que les auteurs nomment « *consistent with naïve theories* », c'est-à-dire compatibles à la fois avec la conception spontanée et la conception scientifique. Pour ces énoncés, il n'y a donc pas de compétition entre différentes conceptions et, par conséquent, pour produire une réponse scientifiquement appropriée la conception spontanée suffit. Par exemple, dans le cas de l'énoncé « La Lune tourne autour de la Terre », une conception spontanée géocentrique selon laquelle la Terre est au centre du système solaire tout comme une

conception scientifique héliocentrique selon laquelle le Soleil est le centre du système solaire mène à formuler une réponse scientifiquement appropriée (vrai). D'autres énoncés étaient plutôt de type « incongruent », ce que les auteurs nomment « *inconsistent with naïve theories* », c'est-à-dire incompatibles avec la conception spontanée du phénomène. Pour ces énoncés, il y a donc compétition entre différentes conceptions. Par conséquent, pour produire une réponse scientifiquement appropriée, il est par hypothèse présumé qu'il est nécessaire de mobiliser la conception scientifique du phénomène. La mobilisation d'une conception spontanée du phénomène mènerait à une réponse scientifiquement inappropriée. Par exemple, dans le cas de l'énoncé « Le Soleil tourne autour de la Terre », une conception spontanée géocentrique selon laquelle la Terre est au centre du système solaire mène à formuler une réponse scientifiquement inappropriée (vrai). La mobilisation d'une conception scientifique héliocentrique selon laquelle le Soleil est le centre du système solaire est requise pour formuler une réponse scientifiquement appropriée (faux). Les termes « congruent et incongruent » sont empruntés des écrits anglophones et, bien qu'ils n'aient pas le sens voulu dans la langue française, ils sont retenus par souci d'uniformité et d'arrimage avec les recherches antérieures (p.ex. Babai et al., 2012; De Neys & Goel, 2011). Ces concepts sont importants pour la suite de cette recherche. Ils seront notamment utilisés plus loin pour définir les conditions de la tâche cognitive (voir section 3.2.2).

Dans la recherche de Shtulman et Valcarcel (2012), les 200 énoncés proposés touchaient à dix domaines, dont l'astronomie, l'évolution, la mécanique et la matière. Les résultats obtenus indiquent que les réponses des participants étaient plus lentes et moins exactes dans le cas des énoncés incongruents, pour l'ensemble des domaines questionnés et ce, peu importe le type de réponse fournie (vrai ou faux). Ce temps de réponse plus lent et cette baisse de performance peuvent être interprétés comme des indices de la présence d'un conflit dans la mobilisation des conceptions. Il semble que mobiliser une conception scientifique plutôt qu'une conception spontanée impliquerait un plus grand effort de raisonnement afin de potentiellement résister à la compétition

existant entre les conceptions. Les résultats de cette étude appuient donc l'idée selon laquelle les conceptions scientifiques sont moins facilement accessibles que les conceptions spontanées et donc qu'un mécanisme de contrôle entre en jeu pour les mobiliser. Les résultats de Shtulman et Valcarcel (2012) étendent la portée de cette hypothèse à davantage de domaines scientifiques. Une recherche subséquente (Shtulman & Harrington, 2016) employant la même méthodologie a aussi démontré que la difficulté à mobiliser les conceptions scientifiques s'observe non seulement à travers les domaines, mais aussi à travers les groupes d'âge. La performance et la vitesse de réponse de participants provenant d'une population de professionnels âgés d'en moyenne 65 ans ont aussi été significativement affectés lorsqu'ils évaluaient l'exactitude d'énoncés incongruents.

### 2.2.2 Le lien entre la mobilisation des conceptions et le contrôle inhibiteur

La difficulté à mobiliser les conceptions scientifiques pourrait expliquer pourquoi, de manière générale, la performance diminue et le temps de réponse est plus lent lorsqu'il faut évaluer une situation (p.ex. énoncé, schéma, question, image) incongruente, c'est-à-dire incompatible avec la conception spontanée du phénomène, par rapport à une situation congruente qui est compatible à la fois avec la conception spontanée et la conception scientifique du phénomène. Elle expliquerait aussi pourquoi le fait de disposer d'un temps de réponse limité diminue l'exactitude des réponses aux situations de type incongruent. Comme mentionné plus haut, dans les situations incongruentes, il y a compétition entre différentes conceptions et, par conséquent, pour produire une réponse scientifiquement appropriée, il est par hypothèse présumé qu'il est nécessaire de mobiliser la conception scientifique du phénomène. Ainsi, le raisonnement sous-jacent à une réponse appropriée d'un point de vue scientifique semble nécessiter un temps supplémentaire pour « évaluer » les conceptions qui entrent en jeu dans cette compétition et mobiliser la conception permettant de fournir une réponse appropriée. Cette compétition semble d'ailleurs se produire même lorsque les conceptions

scientifiques sont maîtrisées comme dans le cas des caractéristiques du vivant chez les élèves du secondaire (Babai, Sekal, et al., 2010) ou encore même après plusieurs années de pratique scientifique (Kelemen et al., 2012).

Or, bien que ce temps de réponse plus long puisse être un indicateur de la complexité du raisonnement nécessaire, il ne permet pas de comprendre ou d'identifier directement les mécanismes impliqués dans ce raisonnement. Une méthodologie utilisant des temps de réponse écourtés présente la même limite. Elle permet de constater qu'en disposant d'un temps de réponse plus court, la difficulté à mobiliser les conceptions scientifiques s'accroît. Néanmoins, elle ne permet pas d'identifier le mécanisme qui permet, lorsque le participant dispose d'un temps suffisant, de mobiliser plus souvent la conception scientifique. Des recherches avancent que ce raisonnement repose sur l'activation du contrôle inhibiteur, une fonction exécutive, qui permettrait de bloquer ou contrôler la conception spontanée pour arriver à mobiliser la conception scientifique.

Le rôle du contrôle inhibiteur pour résister à des réponses qui sont habituelles ou spontanées, afin de mobiliser des réponses alternatives, est relativement bien documenté (Ward, 2010). Le rôle positif du contrôle inhibiteur dans les apprentissages scolaires a d'ailleurs été démontré dans plusieurs domaines dont l'arithmétique, la lecture et les sciences (Ahr, Houdé, & Borst, 2016; Fink et al., 2009; Lanoë et al., 2016). Dans une recherche portant sur la résolution de problèmes d'arithmétique verbaux, Lubin *et al.* (2013) ont montré que, pour réussir avec succès certains problèmes, il faut avoir recours à la capacité d'inhiber une stratégie de raisonnement spontané, mais inapproprié dans un certain contexte. Par exemple, dans le problème « Vrai ou faux : si Marie a 25 billes et qu'elle en a 5 de plus que Jean, Jean a 20 billes », l'élève doit inhiber la stratégie spontanée selon laquelle « je vois "de plus" donc je dois additionner », car dans ce problème l'addition est contraire à l'opération de soustraction appropriée. Ainsi, la stratégie spontanée s'avère, dans ce cas, inappropriée, et doit être bloquée.

En somme, des résultats de recherche sur les difficultés à mobiliser les conceptions spontanées en sciences semblent indiquer que les situations incongruentes mènent souvent à un conflit où des conceptions spontanées et scientifiques contradictoires interfèrent dans la réponse à une question ou un problème et conséquemment ralentit le raisonnement. Ce ralentissement serait un indice du recours à une étape supplémentaire de raisonnement qui consisterait à réaliser un contrôle actif des conceptions spontanées permettant ensuite de mobiliser la conception la plus appropriée dans un contexte scientifique. La prochaine section présente les études qui portent sur le lien entre le contrôle inhibiteur et la capacité de mobiliser les conceptions scientifiques.

### 2.2.3 Le lien entre la mobilisation des conceptions en sciences et le contrôle inhibiteur

Des chercheurs se sont intéressés au lien entre le contrôle inhibiteur et la mobilisation des conceptions scientifiques<sup>4</sup>. Certains de leurs travaux sont présentés dans la section qui suit et leurs limites sont discutées afin de démontrer les lacunes dans l'état actuel des connaissances.

#### 2.2.3.1 Étude pionnière impliquant l'utilisation de tests neuropsychologiques

Kwon et Lawson (2000) sont parmi les premiers chercheurs à s'être intéressés au lien entre le cerveau, les fonctions exécutives et l'apprentissage des concepts en sciences. Leur recherche a exploré la relation entre l'apprentissage de concepts liés à la pression

---

<sup>4</sup> Il est intéressant de faire remarquer que le philosophe des sciences Gaston Bachelard présentait déjà au milieu du 20<sup>e</sup> siècle la connaissance scientifique comme inhibition des affirmations premières ou des croyances (Fedi, 2017). Bien que le concept d'inhibition tel qu'entendu par Bachelard à cette époque était davantage inspiré des écrits en psychanalyse et donc prenait un sens en partie différent, il est tout de même remarquable de constater que le lien entre l'apprentissage des sciences et le contrôle inhibiteur a été envisagé à différentes époques et dans de nombreux domaines dont la psychologie, l'épistémologie, la didactique et les neurosciences cognitives.

des gaz et la maturation de régions préfrontales du cerveau. Les chercheurs ont administré des tests neuropsychologiques mesurant quatre fonctions exécutives, dont le contrôle inhibiteur à un échantillon de plus de 200 étudiants âgés de 13 à 16 ans. Les étudiants ont également répondu à un questionnaire conceptuel sur la pression des gaz. Le questionnaire conceptuel administré en pré-test a révélé que les étudiants éprouvent des difficultés à mobiliser des conceptions scientifiques associées au phénomène de la pression des gaz. Ceux-ci mobilisent davantage des conceptions spontanées qui sont scientifiquement inappropriées, dont « une force de succion indépendante de la pression » et « l'air n'a pas de masse ». Les étudiants ont ensuite pris part à une intervention pédagogique de 14 leçons sur ce concept de pression des gaz suite à quoi ils ont répondu à nouveau au questionnaire conceptuel. Parmi les différentes fonctions exécutives évaluées, le contrôle inhibiteur mesuré par le test du tri de cartes du Wisconsin (Nyhus & Barceló, 2009) s'est avéré le plus fortement corrélé à l'apprentissage du concept de pression des gaz. En effet, les élèves qui ont démontré une meilleure capacité à mobiliser les conceptions scientifiques sont aussi ceux démontrant une meilleure capacité de contrôle inhibiteur. Ce dernier résultat semble indiquer un lien entre l'apprentissage du concept de la pression des gaz et le contrôle inhibiteur. Il pourrait possiblement être impliqué dans la mobilisation des conceptions scientifiques plutôt que des conceptions spontanées observées lors du pré-test.

#### 2.2.3.2 Première vague de recherches en imagerie cérébrale comparant experts et novices

Suite aux travaux de Kwon et Lawson (2000), des recherches ont employé l'imagerie cérébrale pour tenter d'approfondir la compréhension du lien entre le contrôle inhibiteur et l'apprentissage des concepts scientifiques. Une recherche pilote a tenté d'identifier les caractéristiques cérébrales associées à l'expertise conceptuelle en physique (Dunbar, Fugelsang, & Stein, 2007). Des adultes novices adhérant à des conceptions spontanées ont été comparés à des adultes experts qui, eux, mobilisaient

des conceptions scientifiques pour répondre à des questions de physique mécanique. Les novices n'avaient suivi aucun cours de physique de niveau secondaire ou postsecondaire et les experts avaient suivi au moins cinq cours de physique de niveau universitaire. À l'aide de l'IRMf, les chercheurs ont comparé les activations cérébrales des deux groupes alors qu'ils devaient évaluer l'exactitude de films présentant des balles en chute libre sous vide. Certains films étaient naïfs, c'est-à-dire qu'ils ne respectaient pas la physique newtonienne selon laquelle l'accélération gravitationnelle est constante si l'on néglige la résistance de l'air. Dans ces films, les balles plus lourdes tombaient plus rapidement. D'autres films étaient newtoniens puisque les balles plus lourdes comme les plus légères tombaient à la même vitesse.

Les novices répondaient le plus souvent à tort que les films naïfs étaient exacts. Leur cortex frontal médial, que les auteurs attribuent aux représentations préexistantes qui s'apparentent aux conceptions spontanées, était significativement plus activé que dans le cas de films newtoniens. Ce résultat laisse à penser que les films naïfs étaient conformes aux conceptions spontanées des novices. La plupart des novices répondaient aussi le plus souvent à tort que les films newtoniens étaient inexacts. Cette fois, le cortex cingulaire était davantage activé, une région du cerveau responsable de la détection de conflits. Ce résultat peut signifier que les films newtoniens étaient en contradiction avec les conceptions spontanées des novices et que ceux-ci les traitaient comme des erreurs.

Les experts, quant à eux, donnaient généralement une réponse scientifiquement appropriée, à savoir que les films naïfs étaient inexacts. Cette réponse s'accompagnait de l'activation du cortex cingulaire antérieur, associé à la détection de conflits. Or, leur cortex médial frontal était également activé, suggérant que leur représentation antérieure ou conception spontanée aient encore des traces au niveau cérébral. Une interprétation possible serait que les experts ont inhibé leur conception spontanée pour arriver à mobiliser la conception scientifique.

Une seconde étude pilote a tenté cette fois d'identifier les mécanismes cérébraux associés à l'expertise conceptuelle en chimie (Nelson, Lizcano, Atkins, & Dunbar, 2007). Cette étude a comparé un groupe d'experts constitué de neuf étudiants en chimie au niveau postsecondaire alors que le groupe de novices était formé de dix étudiants d'autres domaines. Comme dans la recherche de Dunbar et al. (2007), les participants étaient invités à juger de l'exactitude de films naïfs et scientifiques, mais cette fois, il s'agissait de représentations moléculaires du changement de phase de liquide à gazeux. Les résultats montrent que, comme il était attendu, les experts en chimie mobilisaient une conception scientifique alors que les novices adhéraient davantage à une conception spontanée du phénomène. Au niveau cérébral, les experts démontraient davantage d'activité dans le cortex préfrontal dorsolatéral et le cortex préfrontal ventrolatéral gauches que les auteurs interprètent comment un indice d'un traitement de l'information de nature sémantique et conceptuelle ainsi qu'à la sollicitation de la mémoire de travail. Les novices présentaient quant à eux davantage d'activité dans le cortex temporal inférieur et le cortex occipital, une région principalement associée au traitement perceptuel de l'information. En somme, il semble que les experts montrent des activations dans les régions frontales du cerveau qui sont en lien avec les fonctions exécutives, dont le contrôle inhibiteur, alors que les novices activent des régions plus liées à des stratégies perceptuelles qui ne sont pas en lien avec les fonctions exécutives. Plusieurs recherches récentes associent d'ailleurs le cortex préfrontal ventrolatéral gauche au contrôle inhibiteur (p.ex. Badre & Wagner, 2007; Chambers, Garavan, & Bellgrove, 2009; Vidal, Mills, Pang, & Taylor, 2012). Les résultats obtenus par Nelson et al. (2007) semblent donc également appuyer l'idée que le contrôle inhibiteur puisse être associé à la capacité de mobiliser des conceptions scientifiques, du moins, chez des experts.

Néanmoins, bien que ces études représentent de premiers résultats prometteurs, ils doivent être interprétés avec prudence puisqu'il s'agit de résultats tirés d'études pilotes

publiées sous la forme d'acte de colloque (Dunbar et al., 2007) et de résumé de communication (Nelson et al., 2007) pour lesquels l'information disponible est limitée. En effet, peu de détails sont fournis quant à la méthodologie employée, aux résultats obtenus et aux méthodes d'analyse des données employées, dont les prétraitements des données, les tests statistiques et les seuils de significativité. De plus, les comparaisons utilisées pour obtenir les activations cérébrales ne sont pas précisées, par exemple une comparaison entre les groupes d'experts ou de novices ou encore une comparaison entre les deux types de films naïfs et scientifiques. Il n'est pas non plus spécifié si toutes les activations trouvées sont mentionnées puisqu'aucun tableau des résultats n'est présenté. Enfin, les échantillons sont de tailles relativement limitées. Ces résultats semblent donc constituer des hypothèses de travail intéressantes qui méritent d'être approfondies afin d'en vérifier la validité et la portée.

#### 2.2.3.3 Seconde vague de recherches en imagerie cérébrale comparant experts et novices

Suite aux recherches de Dunbar et al. (2007) et Nelson (2007), deux études ont tenté d'identifier les mécanismes cérébraux liés à l'expertise conceptuelle en sciences. La première s'est intéressée aux mécanismes cérébraux associés à l'expertise en électricité (Masson et al., 2014). Dans cette recherche, les participants devaient évaluer l'exactitude de schémas de circuits électriques dont certains étaient naïfs, puisqu'ils mettaient en jeu la conception spontanée selon laquelle un seul fil est nécessaire pour faire allumer une ampoule. Les autres circuits étaient scientifiques puisque l'ampoule ne s'allumait que si elle était branchée aux deux bornes d'une pile de sorte à former une boucle de courant. Les 12 novices étaient des étudiants ne possédant aucune formation scientifique postsecondaire alors que les 11 experts étaient des étudiants de baccalauréat en physique. Les résultats montrent que les experts activent davantage que les novices des régions cérébrales associées au contrôle inhibiteur lorsqu'ils répondent

correctement à des circuits naïfs : le cortex préfrontal (dorsolatéral et ventrolatéral) et le cortex cingulaire antérieur. Cette étude suggère donc que la capacité des experts en électricité à mobiliser les conceptions scientifiques soit associée au contrôle inhibiteur.

Une deuxième étude (Brault Foisy et al., 2015) s'est inspirée des travaux de Dunbar et al. (2007). Dans cette recherche, des experts et des novices en physique devaient juger l'exactitude de films de balles en chute libre où la résistance de l'air est négligeable. Comme pour l'étude de Dunbar et al. (2007), les films naïfs étaient conçus à partir d'une conception spontanée selon laquelle les objets plus lourds tombent plus rapidement que les objets plus légers. Les résultats indiquent que les experts en physique activent davantage que des novices des régions associées au contrôle inhibiteur : le cortex préfrontal (dorsolatéral et ventrolatéral). Ces résultats mènent également à penser que les experts en physique activent toujours, malgré leur formation scientifique poussée, des régions associées au contrôle inhibiteur pour arriver à mobiliser les conceptions qui permettent de donner des réponses scientifiquement appropriées.

#### 2.2.3.4 Synthèse et limites des connaissances actuelles

Une étude pionnière (Kwon & Lawson, 2000) a montré, à partir de tests neuropsychologiques, que le contrôle inhibiteur était la fonction exécutive la plus fortement corrélée à l'apprentissage du concept de la pression de l'air chez les adolescents. Des études ont ensuite obtenu des résultats allant dans le même sens en comparant l'activité cérébrale d'experts et de novices en sciences alors qu'ils évaluaient l'exactitude de schémas de circuits électriques et films de balles en chute libre qui impliquent des conceptions spontanées. En effet, depuis la première étude en neuroimagerie de Dunbar et al. (2007), des études ont corroboré, en totalité ou en partie, le lien pressenti entre le contrôle inhibiteur et l'expertise conceptuelle en sciences (Brault Foisy et al., 2015; Masson et al., 2014; Nelson et al., 2007). Des recherches

mènent donc à penser que la capacité à mobiliser les conceptions en sciences puisse être expliquée par le recours au contrôle inhibiteur.

Or, les recherches menées jusqu'à présent ne permettent pas de conclure à un lien entre le contrôle inhibiteur et les difficultés conceptuelles des élèves en sciences, c'est-à-dire les difficultés à mobiliser les conceptions scientifiques. Les résultats de Kwon (2000) mènent à penser que le contrôle inhibiteur est associé à la capacité à mobiliser les conceptions scientifiques. Toutefois, les résultats de Kwon et Lawson (2000) sont obtenus à partir d'un test neuropsychologie qui est une mesure différée du contrôle inhibiteur. Ils ne permettent pas de comparer comment les participants ont recours au contrôle inhibiteur pendant qu'ils répondent à des questions qui impliquent des conceptions spontanées. De plus, les résultats portent sur un concept unique, la pression de l'air.

Les recherches menées sur les différences entre les experts et les novices (Brault Foisy et al., 2015; Dunbar & Stein, 2007; Masson et al., 2014; Nelson et al., 2007) ont quant à elles impliqué uniquement des participants adultes qui n'avaient pas reçu le même niveau de formation scientifique. Bien que les résultats appuient l'idée d'un lien entre la capacité des experts à mobiliser les conceptions scientifiques et le contrôle inhibiteur, ce lien n'est pas nécessairement transférable aux difficultés conceptuelles des élèves. D'abord, les experts et les novices n'ont pas reçu une formation scientifique similaire; il est donc difficile de déterminer si l'activation du contrôle inhibiteur chez les experts est associée à leur meilleure capacité à mobiliser la conception scientifique dans le contexte précis des tâches données (circuits électriques, changement de phase ou chute libre) ou encore à leur formation scientifique plus poussée. Il serait par exemple possible que la nature du cursus universitaire en sciences favorise un développement plus important du contrôle inhibiteur que d'autres cheminements académiques comme ceux poursuivis par les novices (sciences politiques, histoire, etc.). Ces études n'écartent pas non plus la possibilité que les étudiants admis dans les

programmes universitaires en sciences possèdent de manière générale un contrôle inhibiteur plus développé. Il est possible d'envisager qu'en raison des exigences d'entrée dans ces programmes, un certain profil d'étudiant soit avantageé et que des variables potentiellement confondantes empêchent de pouvoir conclure que les résultats observés entre des experts et des novices peuvent s'appliquer également à des élèves ayant une formation scientifique similaire. De plus, les concepts scientifiques abordés dans ces études se limitent aux circuits électriques, à la chute libre et au changement de phase.

En somme, le fait que des élèves ayant pourtant profité d'une instruction scientifique comparable éprouvent à des degrés variables des difficultés conceptuelles demeure insuffisamment compris, notamment au regard de l'implication du contrôle inhibiteur. Jusqu'à maintenant, peu ou aucune recherche ne s'est intéressée au lien entre le contrôle inhibiteur et les difficultés conceptuelles des élèves en sciences. Cette étude propose de vérifier si les élèves ayant plus de difficulté à mobiliser les conceptions scientifiques sous-activent le contrôle inhibiteur par rapport à d'autres ayant plus de facilité.

### 2.3 Le contrôle inhibiteur

Comme mentionné précédemment, le contrôle inhibiteur est défini comme une fonction exécutive qui permet de réguler nos actions. Les neuropsychologues s'intéressent depuis environ un siècle à cette fonction et en font l'étude principalement à partir de tests neuropsychologiques. En administrant ces tests dans des appareils d'imagerie cérébrale, les chercheurs ont pu observer le contrôle inhibiteur à un autre niveau d'analyse, celui du cerveau. Ils ont ainsi pu associer le contrôle inhibiteur à un réseau fonctionnel de trois principales régions cérébrales : le cortex préfrontal ventrolatéral, le cortex préfrontal dorsolatéral et le cortex cingulaire antérieur.

De manière générale, le contrôle inhibiteur est entendu dans cette recherche comme un mécanisme qui permet d'exercer un contrôle sur la mobilisation des conceptions lorsqu'il se produit un conflit. Dans les sections qui suivent, le concept est défini et le choix d'adopter une approche neuroscientifique à l'étude du contrôle inhibiteur est expliqué.

### 2.3.1 Une définition

Le contrôle inhibiteur, tel que défini dans cette étude, est un concept issu du champ de la psychologie cognitive. Il réfère au mécanisme qui permet de bloquer l'exécution de réflexes inappropriés dans certains contextes et par conséquent de résister aux interférences que peuvent engendrer des informations non pertinentes ou des distracteurs (Bjorklund & Harnishfeger, 1995). Bien que le concept de contrôle inhibiteur apparaisse déjà dans la littérature scientifique du 19<sup>e</sup> siècle, ce sont surtout les travaux de neuropsychologie du 20<sup>e</sup> siècle qui s'y intéresseront systématiquement (Smith, 1992). Dans cette section, le concept de contrôle inhibiteur est d'abord défini d'un point de vue cognitif comme la capacité à empêcher l'exécution de réflexes qui nuisent à l'atteinte d'un objectif (Dempster, 1992). Puis, le contrôle inhibiteur est défini d'un point de vue cérébral comme étant un réseau fonctionnel de régions cérébrales qui supportent cette fonction exécutive.

#### 2.3.1.1 Le niveau cognitif

Le contrôle inhibiteur fait partie des fonctions exécutives, c'est-à-dire des processus cognitifs de haut niveau qui permettent de réguler les pensées, les actions et les comportements (Friedman & Miyake, 2017). Les fonctions exécutives incluent plusieurs habiletés, dont le contrôle d'automatismes, la résistance aux distractions, la planification ainsi que différents aspects associés à la mémoire de travail comme la manipulation et le maintien de l'information. Elles assurent le contrôle dans l'exécution des conduites et elles exercent un rôle essentiel dans la capacité d'adaptation avec les

demandes changeantes d'une tâche ou les conditions variables d'un environnement (Garavan, 2002). Les fonctions exécutives sont associées à l'accomplissement de tâches cognitives complexes comme la résolution de problème, la modification du comportement en vue de l'atteinte d'objectifs ou encore la génération de nouvelles stratégies dans une situation donnée (Elliott, 2003). En bref, les fonctions exécutives permettent de contrôler nos comportements et, lorsque la situation le requiert, prendre des décisions stratégiques (Houdé, 2004).

La typologie des fonctions exécutives peut varier selon les chercheurs. Par exemple, pour Diamond (2013), le noyau de ces fonctions est composé de l'inhibition de la réponse ou la résistance aux impulsions, du contrôle de l'interférence, de l'inhibition cognitive, de la mémoire de travail ainsi que de la flexibilité cognitive qui permet notamment d'envisager différentes perspectives (voir figure 2.1).

Friedman et Miyake (2017) ont plutôt mis de l'avant une typologie tripartite qui inclut le transfert (*shifting*), l'actualisation (*updating*) et l'inhibition. D'autres proposent d'y inclure la mémoire de travail, la prise de décision, la planification, l'initiative et la flexibilité mentale (Funahashi, 2001).

Malgré certaines divergences, les typologies des fonctions exécutives incluent toutes une composante associée au contrôle inhibiteur. De manière générale, le contrôle inhibiteur est défini comme une fonction exécutive qui intervient pour superviser ou contrôler les actions (Houdé et al., 2000). Il permet de contrôler l'attention, le comportement ou les pensées pour résister à une prédisposition interne afin de faire ce qui est plus approprié (Diamond, 2013). À l'inverse, un déficit du contrôle inhibiteur

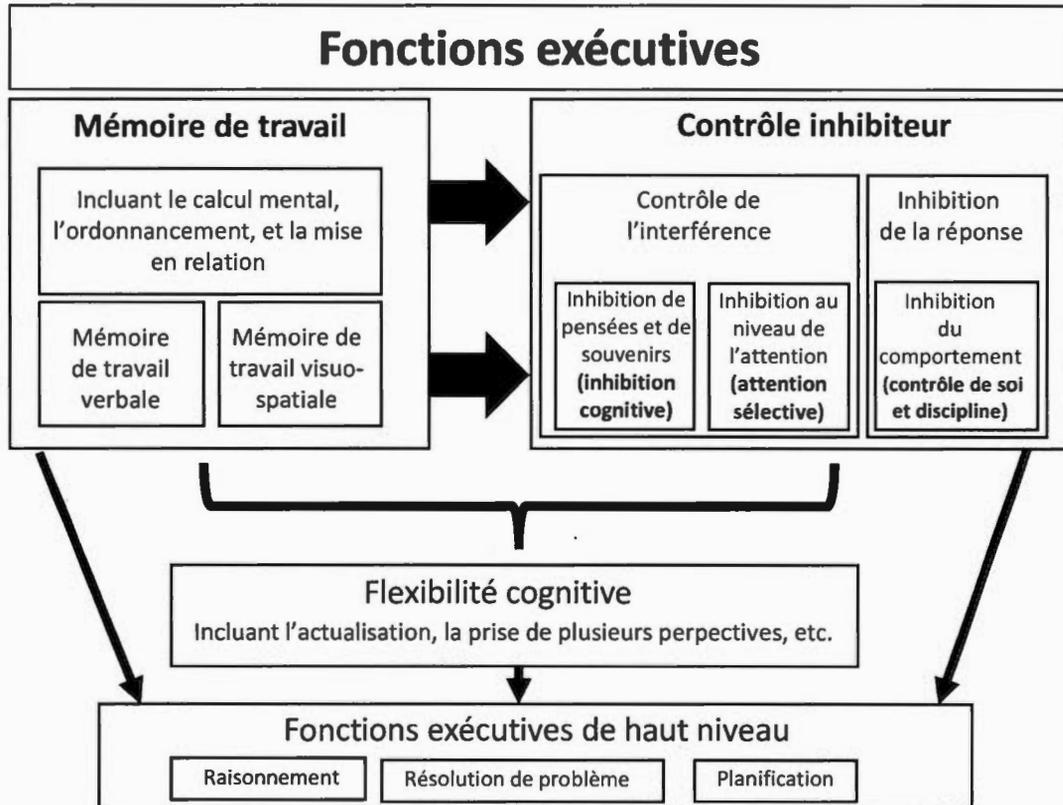


Figure 2.1 Le contrôle inhibiteur au sein des fonctions exécutives selon Diamond (2013)

peut notamment être associé à un déficit de l'attention (Wright, Lipszyc, Dupuis, Thayapararajah, & Schachar, 2014). Le contrôle inhibiteur est l'habileté à la base de notre capacité à faire des choix et d'opérer des changements puisqu'il permet de résister à une habitude, à une stratégie ou à une réponse spontanée et tentante, mais qui mène à un comportement ou à une réponse inappropriée dans un contexte donné (Dempster & Corkill, 1999; Houdé & Borst, 2014). Le contrôle inhibiteur permet aussi d'empêcher l'expression de comportements inappropriés, dangereux ou devenus inutiles (Chambers et al., 2009). En somme, il désigne la capacité à résister et à

contrôler des automatismes qui peuvent parfois nous mener à commettre des erreurs (Houdé & Borst, 2014).

Le contrôle inhibiteur s'observe à plusieurs niveaux (Diamond, 2013). Le contrôle inhibiteur de l'attention permet de faire preuve d'une attention sélective en ignorant volontairement certains stimulus. Ce type de contrôle inhibiteur est parfois appelé le contrôle attentionnel ou l'inhibition attentionnelle. À un autre niveau, l'inhibition cognitive permet quant à elle de contrôler les représentations mentales. Ce niveau implique de résister à des pensées ou des inférences et il est souvent associé à la mémoire de travail puisqu'il permettrait de contrôler la récupération en mémoire. Enfin, le contrôle inhibiteur peut également s'observer au niveau du contrôle de soi qui consiste à résister à des tentations ou des impulsions. Le contrôle de soi peut également permettre le contrôle en l'absence de pensées concurrentes, par exemple pour éviter de sauter à une conclusion avant d'avoir analysé une situation ou pour donner une réponse plus réfléchie. Dans cette recherche, le contrôle inhibiteur est entendu au sens d'inhibition cognitive telle que définie par Diamond (2013), c'est-à-dire le contrôle de représentations mentales. Celles-ci s'apparentent aux conceptions spontanées des élèves qui ont été définies précédemment comme des représentations qu'ils entretiennent à l'égard de phénomènes naturels. Il permet de protéger l'espace mental de la mémoire de travail en bloquant les informations non pertinentes (Diamond, 2013; Engelhardt, Nigg, Carr, & Ferreira, 2008).

#### 2.3.1.2 Le niveau cérébral

Le contrôle inhibiteur s'observe non seulement au niveau cognitif, par exemple par un ralentissement du temps de réponse et une baisse de la performance (voir les recherches présentées à la section 2.2.1) ou encore par des tests neuropsychologiques (p.ex. Kwon & Lawson, 2000), mais aussi, grâce aux recherches en neurosciences, au niveau de l'activité neuronale et cérébrale. Le contrôle inhibiteur est d'abord un mécanisme

neuronal qui se déroule dans les synapses, c'est-à-dire des ponts fonctionnels entre les neurones (Zucker, Kullmann, & Schwarz, 2004). Les synapses sont les voies de communication privilégiées des neurones par lesquelles sont transmis les influx nerveux qui circulent d'un neurone à l'autre par l'entremise d'un potentiel d'action (un courant électrique). Lorsque le potentiel d'action atteint son seuil d'excitabilité, l'influx nerveux traverse le neurone d'une extrémité à l'autre. À l'inverse, si le potentiel d'action n'atteint pas le seuil d'excitabilité, aucun influx nerveux n'est généré. Comme les neurones ne se touchent pas (ils sont séparés par quelques dizaines de nanomètres), le potentiel d'action ne peut sauter d'un neurone à l'autre, il est plutôt généré par la sécrétion de messagers chimiques nommés neurotransmetteurs qui sont regroupés en deux principaux types : les neurotransmetteurs excitateurs et les neurotransmetteurs inhibiteurs. Les neurotransmetteurs excitateurs ont pour effet d'abaisser le seuil d'excitabilité du neurone, donc facilitent la génération du potentiel d'action, alors que les neurotransmetteurs inhibiteurs augmentent le seuil d'excitabilité, donc nuisent à la génération du potentiel d'action.

En plus d'être un phénomène au niveau neuronal, le contrôle inhibiteur est également une fonction attribuée à un réseau fonctionnel de régions cérébrales et c'est dans ce sens qu'il est entendu dans cette recherche. De ce point de vue, le contrôle inhibiteur désigne une diminution de l'activité d'une région spécifique du cerveau due au contrôle exercé par une autre région (Ward, 2010) ou encore la capacité d'un réseau neuronal à empêcher l'activation d'un autre réseau neuronal qui serait autrement activé. Depuis les toutes premières études en neuropsychologie, le cortex préfrontal a été pressenti comme jouant un rôle-clé dans le soutien du contrôle inhibiteur (Chambers et al., 2009). Des études en neurosciences ont en effet révélé un réseau de régions cérébrales préfrontales mobilisées lors de l'activation du contrôle inhibiteur (Wagner, Bunge, & Badre, 2004). Grâce à l'imagerie cérébrale, il a été possible d'observer ce qui se passe dans le cerveau lorsqu'une erreur de raisonnement est bloquée ou inhibée et qu'une stratégie alternative est activée.

### 2.3.2 Identification du réseau de régions cérébrales liés au contrôle inhibiteur

L'identification des régions cérébrales impliquées dans le contrôle inhibiteur repose sur l'utilisation de tests et de tâches neuropsychologiques développés dans le but d'évaluer la capacité de résister à une habitude, une stratégie ou une réponse prédominante ou spontanée. Pour réussir ces tâches, un participant doit résoudre une interférence (ou conflit). L'activité cérébrale observée lors de la résolution du conflit est interprétée comme étant associée au contrôle inhibiteur.

Or, comme le soulignent Monette et Bigras (2008), la mesure du contrôle inhibiteur comporte certains défis puisqu'il interagit avec les autres fonctions exécutives comme la mémoire de travail et la flexibilité cognitive (voir figure 2.1) ainsi qu'avec d'autres fonctions cognitives non exécutives comme les processus visuospatiaux. Par conséquent, il peut être difficile de mesurer indépendamment le contrôle inhibiteur sans le confondre avec d'autres processus cognitifs. Par exemple, lors du test du tri de cartes du Wisconsin (Grant & Berg, 1948) décrit plus loin dans cette section, les participants développent une réponse habituelle ou spontanée qui doit être soudainement bloquée pour s'adapter à une nouvelle règle. Ce test peut donc être associé à la fois au contrôle inhibiteur pour bloquer la réponse apprise, ainsi qu'à la flexibilité cognitive pour s'adapter à une nouvelle règle (Nyhus & Barceló, 2009). Il est aussi important de noter que chacune des régions cérébrales fait partie d'un réseau complexe. Par conséquent, il serait erroné de penser pouvoir identifier des régions exclusivement associées au contrôle inhibiteur. Ces régions participent au contrôle inhibiteur, toutefois, elles peuvent jouer d'autres rôles et faire partie d'autres réseaux fonctionnels.

Afin de pallier à ces limites, l'une des stratégies possibles est de considérer les résultats provenant de différentes tâches afin de trianguler les résultats et d'identifier les régions cérébrales communes à un ensemble de tests. De cette façon, le risque d'identifier des

régions qui sont associées à d'autres fonctions exécutives ou qui sont plus dépendantes du contexte ou de la tâche est minimisé. Ainsi, pour attribuer une signification fonctionnelle à ces régions, leur activation doit être observée à travers un ensemble de tâches qui, malgré leurs différences, partagent une propriété commune qui est de nécessiter le recours au contrôle ou blocage de réponses ou d'actions. De plus, l'interprétation des résultats doit être faite à la lumière des théories du contrôle inhibiteur sous-jacentes, de la qualité des tâches et des données comportementales (p.ex. exactitude et temps de réponse, voir section 2.3.3). Dans les paragraphes qui suivent, les résultats de recherche en neuroimagerie de trois tests parmi les plus répandus (*Stroop*, *Go/no-go* et *Wisconsin Card Sorting*) sont présentés afin de faire émerger les principales régions cérébrales impliquées dans le contrôle inhibiteur.

#### 2.3.2.1 La tâche de Stroop

Lors d'une tâche classique de Stroop (1935), les participants voient un à un des mots écrits de différentes couleurs et la consigne est de nommer la couleur des mots qui sont eux-mêmes des noms de couleurs. Certains mots sont neutres, c'est-à-dire que le mot lui-même correspond à sa couleur. Par exemple, le mot « rouge » est écrit en rouge. D'autres mots sont dits incohérents. Par exemple, le mot « rouge » est écrit en bleu. La tâche repose sur le principe suivant : pour répondre correctement, le participant doit parvenir à inhiber ou bloquer l'information non pertinente à la tâche (le sens du mot), pour prendre plutôt appui sur l'information pertinente (la couleur du mot). La performance des participants est considérablement réduite et leur temps de réponse est plus lent lorsque les mots sont incohérents. Cette expérimentation conçue par John Ridley Stroop (1935) existe sous différentes adaptations, dont le *Counting Stroop* (Bush, Whalen, Shin, & Rauch, 2006), le *Numerical Stroop* (Besner & Coltheart, 1979) et le *Animal Stroop* (Wright, Waterman, Prescott, & Murdoch-Eaton, 2003), mais l'effet a été répliqué plusieurs centaines de fois et il s'agit d'une des familles des tâches les plus utilisées pour évaluer la capacité de contrôle inhibiteur.

Une équipe de recherche a utilisé une adaptation de la tâche de Stroop originale, le *Counting Stroop* (Bush et al., 1998, 2006), qui est optimisé pour les recherches en imagerie cérébrale. En utilisant l'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle (IRMf), les chercheurs ont observé que lorsque les participants résistent à l'interférence, le cortex cingulaire antérieur (CCA) et le cortex préfrontal dorsolatéral (CPDL) sont davantage activés. Une étude (Leung, Skudlarski, Gatenby, Peterson, & Gore, 2000) utilisant la tâche de Stroop originale corrobore ses résultats. Les chercheurs ont observé des activations plus importantes dans le CCA, le CPDL ainsi que dans le cortex préfrontal ventrolatéral (CPVL) lors de la présentation de noms de couleur incohérents. Enfin, une autre étude a également observé une activation significative du CCA et du CPDL lors de la présentation de mots incohérents (MacDonald, Cohen, Stenger, & Carter, 2000).

### 2.3.2.2 Le test du tri de cartes du Wisconsin

Le test du tri de cartes du Wisconsin (*Wisconsin Card Sorting Test*) (Grant & Berg, 1948) implique des cartes qui diffèrent en trois points : 1) motif (carré, étoile, triangle ou croix); 2) couleur (rouge, vert, bleu ou jaune) et 3) nombre d'items dans le motif (1, 2, 3 ou 4). Les participants détiennent une carte et la consigne est d'associer cette carte à l'une de quatre cartes qui leur sont présentées. Aucune autre consigne n'est donnée. Les participants doivent donc choisir selon quels critères ils établissent leur association (type de motif, couleur du motif ou nombre d'items). Après chacune des tentatives, le participant reçoit une rétroaction qui lui indique si l'association est valide ou invalide. Si l'association est invalide, le participant est invité à faire une autre tentative, alors que si l'association est valide, le participant peut passer aux cartes suivantes. Le critère d'association est généralement maintenu pour un ou plusieurs essais. Puis, sans avertir le participant, le critère est modifié et les participants doivent apprendre à adapter leur réponse en fonction de la rétroaction qu'ils reçoivent. Cette

tâche induit donc chez le participant une réponse qui devient habituelle ou spontanée, mais requiert ensuite que cette réponse soit bloquée (contrôle inhibiteur) pour s'adapter à de nouvelles exigences de la tâche lorsqu'un nouveau critère est établi (flexibilité cognitive).

Avant même l'avènement de l'imagerie cérébrale, Milner (1963) a observé que les patients atteints d'une lésion au CPDL performaient moins bien au test de Wisconsin. Ces patients avaient tendance à continuer d'associer les cartes selon un certain critère, même après une rétroaction négative. Ce résultat semble indiquer que le CPDL est associé au contrôle inhibiteur ainsi qu'à la flexibilité cognitive, c'est-à-dire un changement de mode de raisonnement. D'autres études ont par la suite montré que le CCA, le CPDL ainsi que le CPVL sont plus activés lorsque les participants devaient modifier leur critère d'association et donc inhiber la règle préalablement apprise (Lie, Specht, Marshall, & Fink, 2006; Monchi, Petrides, Petre, Worsley, & Dagher, 2001; Nyhus & Barceló, 2009).

### 2.3.2.3 La tâche de Go/no-go

Lors d'une tâche de *Go/no-go*, des lettres de l'alphabet latin apparaissent consécutivement à l'écran. Les participants doivent appuyer sur un bouton (*go*) à chaque fois qu'une lettre apparait à l'exception de la lettre X (*no-go*). Lors de l'affichage d'un « X », les participants doivent donc inhiber la tendance à répondre en appuyant sur le bouton. Deux des premières recherches à avoir étudié les activations cérébrales associées à la tâche *Go/no-go* ont observé que le CCA, le CPDL et le CPVL étaient davantage activés dans les essais nécessitant d'inhiber une réponse (*no-go*) que dans les essais habituels (*go*) (Liddle, Kiehl, & Smith, 2001; Menon, Adleman, White, Glover, & Reiss, 2001). Une autre étude a utilisé une tâche apparentée, le *Stop Signal Task* (Chen, Muggleton, Tzeng, Hung, & Juan, 2009) et les résultats montrent qu'une

autre région du cortex préfrontal, le cortex moteur supplémentaire (CMS), semble être liée à la capacité d'inhiber une réponse motrice comme le fait d'appuyer sur un bouton lors d'un signal donné.

#### 2.3.2.4 Une synthèse des résultats

En somme, il en ressort que le contrôle inhibiteur est principalement associé à un réseau fonctionnel composé du cortex préfrontal ventrolatéral (CPVL), du cortex préfrontal dorsolatéral (CPDL) et du cortex cingulaire antérieur (CCA) (Garavan, 2002) (voir figure 2.2). Le Tableau 2.1 résume les résultats présentés dans cette section.

Tableau 2.1 Sommaire des résultats de recherche sur le réseau cérébral associé au contrôle inhibiteur

Étude	Tâche	Régions observées		
		CPVL	CPDL	CCA
(Leung et al., 2000)	<i>Color Stroop</i>	✓	✓	✓
(Bush et al., 1998)	<i>Counting Stroop</i>		✓	✓
(MacDonald et al., 2000)	<i>Color Stroop</i>		✓	✓
(Milner, 1963)	<i>Wisconsin Card Sorting</i>		✓	
(Lie et al., 2006)	<i>Wisconsin Card Sorting</i>	✓	✓	✓
(Monchi et al., 2001)	<i>Wisconsin Card Sorting</i>	✓	✓	✓
(Nyhus & Barceló, 2009)	<i>Wisconsin Card Sorting</i>		✓	
(Liddle et al., 2001)	<i>Go/No-Go</i>	✓	✓	✓
(Menon et al., 2001)	<i>Go/No-Go</i>	✓	✓	✓

Le CPVL (Monchi et al., 2001) serait pour plusieurs auteurs la région la plus fortement associée au contrôle inhibiteur (Aron, Robbins, & Poldrack, 2004; Aron, Robbins, & Poldrack, 2014b; MacDonald et al., 2000; Sakagami & Pan, 2007) puisqu'il serait

précisément responsable de l'inhibition ou de la suppression d'une réponse inappropriée dans un contexte donné. Or, le contrôle inhibiteur n'est pas un processus isolé et impliquerait aussi le CCA pour la détection de la nécessité d'inhiber une réponse ainsi que le CPDL pour comparer et mobiliser les conceptions impliquées dans la réponse à fournir (Bush et al., 1998).

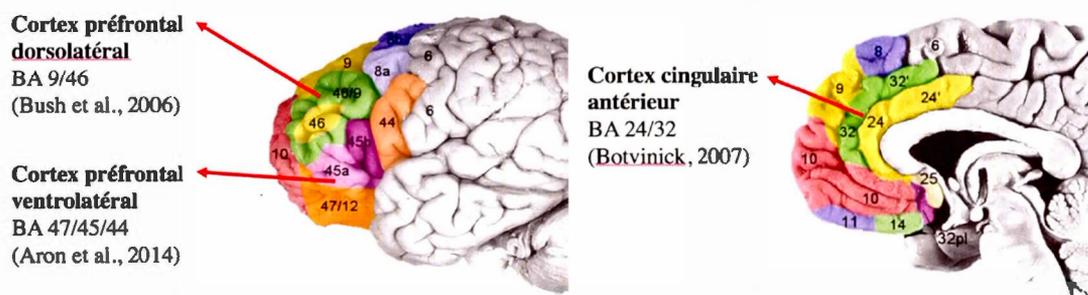


Figure 2.2 Principales régions cérébrales associées au contrôle inhibiteur, adapté de Mirabella (2014)

Le réseau de trois principales régions cérébrales qui ressortent des études présentées va d'ailleurs dans le même sens que la théorie du *conflict monitoring*, une fonction apparentée au contrôle inhibiteur, proposée par Botvinick (2007). Dans ce modèle qui fait notamment référence aux travaux de Hull (1943), le cerveau favoriserait un fonctionnement nécessitant le moins de ressources possible, autrement dit le principe du moindre effort. La détection d'un conflit nécessiterait de mobiliser un mode de fonctionnement plus coûteux, c'est-à-dire qui nécessite davantage d'efforts.

Le CCA serait responsable de détecter les situations de conflit caractérisées par la coexistence de différentes réponses possibles, sortant ainsi le cerveau de son mode « économie d'énergie », et de signaler à des régions du cortex préfrontal la nécessité d'un meilleur contrôle des actions et réflexes (CPDL ou CPVL). Une première

perspective inclut des recherches qui montrent que le CCA est souvent impliqué dans des tâches où la détection de conflits dans le traitement de l'information est nécessaire comme la tâche de Stroop (Bush et al., 1998, 2006) ou les tâches de type Go/no-go (Menon et al., 2001; Vidal et al., 2012). Un second corpus d'études associe le CCA à l'évaluation des conséquences de nos actions. Ces recherches montrent notamment que le CCA est activé suivant, par exemple, une rétroaction négative (Van Duijvenvoorde, Zanolie, Rombouts, Raijmakers, & Crone, 2008). Dans cette perspective, le CCA semble jouer un rôle dans la prise de décision en contribuant à l'analyse coûts/bénéfices de la situation en jeu. Le modèle de Botvinick (2007) permet d'intégrer ces deux perspectives en affirmant que la détection du conflit est impliquée dans la prise de décision de deux façons complémentaires : 1) en signalant la nécessité d'un meilleur contrôle des actions dans le cortex préfrontal et 2) en produisant un renforcement négatif incitant à éviter les actions qui mènent à des erreurs dans certains contextes. En somme, la fonction centrale du CCA est de détecter les situations où plusieurs conceptions ou réponses incompatibles sont en compétition.

Le CPVL serait plus précisément associé à l'implantation même du blocage ou de la suppression de la réponse inappropriée dans un contexte donné. Le CPVL serait connecté à plusieurs régions préfrontales, motrices et sensorielles et exercerait un rôle dans la sélection de l'action ou de la représentation à inhiber (Sakagami & Pan, 2007). Alors que des recherches associent davantage le contrôle inhibiteur au CPVL droit (Aron et al., 2014a; Tsujii & Watanabe, 2010), d'autres études remettent en question cette latéralisation et montrent que le contrôle inhibiteur peut reposer sur l'activité bilatérale du CPVL ou sur l'activité du CPVL gauche (Chambers et al., 2009; Levy & Wagner, 2012).

Swick, Ashley et Turken (Swick, Ashley, & Turken, 2008) ont observé que les patients atteints d'une lésion au CPVL gauche commettent davantage d'erreurs à la tâche de Go/No-Go que des patients atteints d'une lésion dans une région voisine, le cortex

orbitofrontal, et ce, surtout dans les essais plus difficiles, c'est-à-dire qui exigent davantage l'activation du contrôle inhibiteur. Badre et Wagner (2007) ont rapporté dans leur recension des écrits que le CPVL gauche était associé au contrôle des représentations conceptuelles (*controlled retrieval*) que les auteurs définissent comme un accès stratégique aux informations en mémoire. Une autre étude menée en magnétoencéphalographie (MEG) a aussi montré que le CPVL gauche était associé au contrôle inhibiteur lors de la tâche Go/No-Go et que la région était davantage activée chez les adultes que chez les adolescents (Vidal et al., 2012). Des résultats similaires ont d'ailleurs été obtenus en utilisant la même tâche avec un large échantillon (N = 102) (Steele et al., 2013). D'autres chercheurs ont aussi observé une activation plus importante du CPVL gauche chez les enfants qui inhibent l'heuristique « longueur = nombre » dans la tâche classique de conservation du nombre de Piaget (Poirel et al., 2012). Enfin, Aso et al. (2016) ont montré que l'activation du CPVL gauche était aussi associée à l'inhibition des pensées (*thought suppression*). Le contrôle des représentations, des pensées et des actions reposerait donc en partie sur le CPVL, et notamment le CPVL gauche : « *LIFG [Left inferior frontal gyrus] is also critical for suppressing prepotent but inappropriate responses.* » (Swick et al., 2008).

Le CPDL est plutôt associé à la mémoire de travail et à la comparaison de l'information (Miller & Cohen, 2001). Tel que mentionné plus haut, de nombreuses recherches utilisant des tests neuropsychologiques diversifiés ont montré que le CPDL fait partie des régions les plus activées pour inhiber une réponse (p.ex Bush et al., 1998; Leung et al., 2000; Liddle et al., 2001; Lie et al., 2006; MacDonald et al., 2000; Menon et al., 2001; Monchi et al., 2001; Nyhus & Barceló, 2009). Le CPDL serait plus spécifiquement responsable de maintenir l'information pertinente dans la mémoire de travail et plus particulièrement le CPDL gauche (Barbey, Koenigs, & Grafman, 2013). Le CPDL serait également associé à la capacité de mettre en relation plusieurs éléments d'information provenant de différentes régions du cerveau (Blumenfeld, Parks, Yonelinas, & Ranganath, 2011; Blumenfeld & Ranganath, 2006) et à comparer

plusieurs représentations présentes dans la mémoire de travail pour fournir une réponse appropriée (Rowe, Toni, Josephs, Frackowiak, & Passingham, 2000). Les recherches associent plus spécifiquement le CPDL gauche à un processus de sélection de l'information et donc de mobilisation des conceptions (Heekeren, Marrett, Ruff, Bandettini, & Ungerleider, 2006; MacDonald et al., 2000). En somme, le CPDL est considéré comme un centre intégrateur permettant la comparaison et la mobilisation d'une réponse en fonction du contexte.

### 2.3.3 Une approche neuroscientifique à l'étude du contrôle inhibiteur

L'étude du contrôle inhibiteur pose un défi, car bien que la capacité d'inhiber puisse s'acquérir de manière consciente notamment par des interventions éducatives (p.ex. Houdé et al., 2000), le contrôle inhibiteur est généralement activé sans qu'il soit nécessairement porté à la conscience. Il s'avère donc difficile de vérifier la relation entre le contrôle inhibiteur et les difficultés à mobiliser les conceptions scientifiques à partir d'une hypothèse de recherche strictement comportementale qui suppose le recours à des mesures auto-déclarées comme des questionnaires, des entretiens ou des tests. En effet, comme le contrôle inhibiteur peut être inconscient, il n'est pas toujours possible pour un participant de rapporter son activation dans un questionnaire. De plus, l'utilisation d'un questionnaire entraîne nécessairement un décalage entre l'activation du contrôle inhibiteur et sa mesure, ce qui peut en compromettre la fiabilité de la mesure. Enfin, le contrôle de conceptions peut être masqué par les réponses, scientifiquement correctes, fournies par les élèves, parce que le blocage peut se produire sans être porté à la conscience.

Pour observer l'activation du contrôle inhibiteur, il est donc préférable de ne pas se fier uniquement aux réponses fournies par les participants dans un questionnaire ou lors de l'explicitation de leur démarche de raisonnement qui pourrait être recueillie par un entretien. La mesure de l'activation du contrôle inhibiteur est plutôt réalisée par des

tests neuropsychologiques, par la mesure du temps de réponse et de l'amorçage négatif ou encore par l'imagerie cérébrale qui font l'objet de la prochaine section. Le choix d'aborder l'objectif de cette recherche selon une approche neuroscientifique est également expliqué.

### 2.3.3.1 Les tests neuropsychologiques

Les tests neuropsychologiques adoptent une approche clinique de l'étude du cerveau humain par le comportement. Ces tests cherchent à mesurer de façon quantitative et standardisée certaines des manifestations les plus complexes de l'activité cérébrale dont le contrôle inhibiteur fait partie (Lezak, Howieson, Bigler, & Tranel, 2012). Pour mesurer la capacité de contrôle inhibiteur, deux tests sont fréquemment utilisés : le test *Stroop* et le test *Go/No-Go*. Bien que ces tâches mesurent deux différentes facettes du contrôle inhibiteur (la résistance aux interférences dans le *Stroop* et la suppression de la réponse inappropriée dans le *Go/No-Go*), elles sont associées à l'activation de régions similaires du cerveau, principalement des régions préfrontales ainsi que le cortex cingulaire (Bush et al., 2006; Wright et al., 2014).

Comme discuté précédemment, Kwon et Lawson (2000) ont observé que le contrôle inhibiteur était la fonction exécutive la plus fortement corrélée à l'apprentissage du concept de la pression de l'air chez les adolescents. Toutefois, à partir de ces résultats, il n'est pas possible de conclure que le contrôle inhibiteur est effectivement associé à l'apprentissage des concepts scientifiques puisque les tests neuropsychologiques mesurent une capacité générale de contrôle inhibiteur et non son activation ponctuelle. De plus, les tests neuropsychologiques sont des mesures différées et non en temps réel. Les résultats de Kwon et Lawson (2000), bien que prometteurs, ne peuvent servir à confirmer que les participants ont recours au contrôle inhibiteur pendant qu'ils répondent à des questions impliquant de mobiliser des conceptions scientifiques.

Les tests neuropsychologiques présentent cependant certains avantages. Ils permettent notamment de vérifier des hypothèses intéressantes pour étudier certains aspects développementaux puisque plusieurs fonctions exécutives, dont le contrôle inhibiteur, se développent tout au long de l'enfance et de l'adolescence, n'atteignant leur pleine capacité qu'à l'âge adulte (Eustache, Faure, & Desgranges, 2013). Comme l'utilisation de tests neuropsychologiques est relativement peu dispendieuse, il est généralement possible de mener des études comportant de grands échantillons (ce qui est rarement le cas en neuroimagerie). Néanmoins, comme il a été mentionné précédemment, ces tests ne permettent pas de mesurer l'activation du contrôle inhibiteur en temps réel puisque le participant doit interrompre la tâche pour auto-rapporter sa réponse. Les tests neuropsychologiques sont donc plus pertinents pour mesurer une capacité générale du contrôle inhibiteur ou pour tester des hypothèses exploratoires permettant d'identifier des corrélations entre des mécanismes cérébraux et certains apprentissages.

#### 2.3.3.2 Le temps de réponse et l'amorçage négatif (*negative priming*)

Pour tester une hypothèse sur le contrôle inhibiteur en temps réel, il est possible d'avoir recours à l'analyse des temps de réponse, c'est-à-dire à l'analyse de l'intervalle entre la présentation d'un stimulus et la réponse du participant (Kelemen & Rosset, 2009; Kelemen et al., 2012; Shtulman & Harrington, 2016; Shtulman & Valcarcel, 2012). Ce temps est un indice du niveau de complexité du raisonnement mobilisé pour résoudre la tâche. En général, un temps de réaction plus long indique un processus de raisonnement plus complexe. L'étude du contrôle inhibiteur par le temps de réponse suppose que s'il est nécessaire d'inhiber une réponse plus spontanée pour mobiliser une réponse alternative, le temps de réponse sera plus long que si le contrôle inhibiteur n'est pas requis. L'étude des temps de réponse permet donc de surmonter certaines limites des tests neuropsychologiques qui utilisent une mesure globale et différée du contrôle inhibiteur.

Toutefois, la mesure des temps de réponse comporte également certaines limites (Bago & De Neys, 2017). En effet, dans plusieurs cas, surmonter un réflexe de la pensée et donner une réponse logique peut se faire de manière rapide si, par exemple, elle est automatisée par la pratique. De plus, bien que le contrôle inhibiteur requière souvent un temps de réponse plus élevé pour répondre, un temps de réponse plus élevé n'est pas nécessairement un indice de l'activation du contrôle inhibiteur. Un temps de réponse plus long peut indiquer l'utilisation d'une stratégie ou d'un raisonnement différent qui comporte des étapes supplémentaires ou des étapes qui requièrent plus de temps. Conséquemment, la qualité de l'interprétation d'un temps de réponse plus long est largement tributaire de la qualité de la tâche cognitive utilisée (p.ex. tâche de Stroop) et, surtout, de l'équivalence entre les différentes conditions impliquées dans la tâche (p.ex. mots cohérents, bleu écrit en bleu, et mots incohérents, bleu écrit en rouge).

L'étude du contrôle inhibiteur par temps de réponse est donc intéressante, parce qu'elle permet de repérer des différences dans le raisonnement nécessaire pour répondre à différents types de questions, mais elle n'indique pas précisément et directement la nature de cette différence. Pour mieux distinguer expérimentalement une réponse spontanée d'une réponse nécessitant le contrôle inhibiteur, une méthode basée sur l'amorçage négatif (*negative priming*) a été dérivé des temps de réponse (Tipper, 1985, 2001).

L'amorçage fait référence à la prédisposition engendrée par un stimulus dans le traitement d'un stimulus subséquent. Par l'amorçage positif, la présentation d'une image d'un visage rend par exemple le traitement d'une seconde image d'un visage plus efficace, c'est-à-dire plus rapide et plus exact. À l'inverse, l'amorçage négatif consiste à présenter un stimulus en amorce (*prime*) qui interfère dans le traitement d'une cible (*probe*). Par exemple, présenter une amorce incohérente qui nécessite le recours au contrôle inhibiteur (p.ex. bleu écrit en rouge) rend le traitement d'une cible cohérente (c'est-à-dire pouvant être répondu spontanément sans recourir au contrôle

inhibiteur) plus long et moins exact (p.ex. bleu écrit en bleu). Il est attendu que la présentation d'une amorce incohérente nécessitant l'activation du contrôle inhibiteur cause un amorçage négatif pour le traitement de la cible cohérente qui suit. Babai et al. (2012) ont d'ailleurs observé cet effet d'amorçage négatif dans une tâche de comparaison de périmètres. Les stimulus cohérents précédés d'un stimulus incohérent étaient significativement plus longs à traiter. Dans le cas des stimulus fortement incohérents, l'exactitude diminuait également significativement. Potvin, Sauriol et Riopel (2015) ont obtenu des résultats similaires avec des stimulus incohérents élaborés au départ de conceptions spontanées sur la flottabilité.

Des chercheurs utilisent une version différente de l'amorçage négatif en ajoutant une amorce contrôle (Houdé & Borst, 2014). En utilisant uniquement une amorce et une cible, il est plus difficile de confirmer que l'effet observé sur la cible (*probe*) (le temps de réponse plus long) est dû au contrôle d'une stratégie de raisonnement inappropriée dans un contexte donné ou simplement à l'enchaînement de stimulus. Pour surmonter cette difficulté, des études incluent également une amorce contrôle qui correspond en tout point à l'amorce (*prime*) « test », mais pour laquelle aucun mode de raisonnement inapproprié dans le contexte donné n'est en jeu, donc où il ne se produit ni activation d'un mode de raisonnement, ni son inhibition. Par exemple, dans une étude visant à déterminer si la distinction de lettres miroirs (p.ex. b/d) nécessite l'activation du contrôle inhibiteur, des chercheurs ont demandé à des participants de déterminer si deux mots ou images sont identiques (Brault Foisy, Ahr, Masson, Houdé, & Borst, 2017a). Ils ont utilisé des stimulus du type « vibil / vidil » comme amorce « test » puisqu'ils nécessiteraient d'inhiber la généralisation miroir, c'est-à-dire notre tendance à reconnaître un objet incluant les lettres peu importe son orientation. Ils ont utilisé des stimulus du type « erfos / ertos » comme amorce « contrôle » puisqu'ils ne nécessiteraient ni l'activation d'un mode de raisonnement (la distinction des lettres miroirs), ni son inhibition (une situation où deux objets orientés différemment sont identiques). Ces études privilégient aussi l'insertion de masques entre les paires

d'amorces et de cibles (Ahr et al., 2016). Ces masques s'apparentent à des représentations grises abstraites et favoriseraient le retour au niveau d'activité de base du contrôle inhibiteur. L'une des difficultés associées à l'utilisation de l'amorçage négatif est de trouver une amorce contrôle comparable à l'amorce test, mais pour laquelle l'élément à inhiber n'est pas présent.

En somme, l'amorçage négatif peut fournir des indices de l'activation du contrôle inhibiteur et de son efficacité. À l'aide d'un séquençage précis des stimulus, l'amorçage négatif apporte des preuves supplémentaires à l'effet que pour répondre correctement à certaines questions, il faut avoir recours à la capacité d'inhiber une réponse inappropriée dans un contexte donné. Toutefois, la qualité de l'interprétation des résultats d'une recherche utilisant l'amorçage négatif est toujours hautement dépendante de la qualité de la tâche cognitive utilisée (en particulier du choix de l'amorce contrôle) et, comme pour les tests neuropsychologiques, de l'équivalence entre les différentes conditions impliquées dans la tâche.

#### 2.3.3.3 L'imagerie cérébrale

Pour remédier à certaines des limites de l'observation comportementale du contrôle inhibiteur, il est possible de recourir à l'imagerie cérébrale. Celle-ci permet d'abord de trianguler et de vérifier les résultats comportementaux obtenus par des recherches ayant utilisé les temps de réponse, l'amorçage négatif ou encore les tests neuropsychologiques. Elle permet de mesurer l'activation des régions cérébrales liées au contrôle inhibiteur pendant la réalisation de tâches. Il devient donc possible de comparer en temps réel l'activité cérébrale dans les régions du cerveau associées au contrôle inhibiteur chez des élèves ayant des difficultés conceptuelles par rapport à des élèves ayant davantage de facilité.

Comme mentionné à la section 2.3.1, le contrôle inhibiteur s'observe au niveau cérébral et désigne l'activation de régions du cerveau dont le CPVL, le CPDL et le CCA pour contrôler des réflexes ou actions inappropriés dans un contexte donné (Ward, 2010). Plusieurs techniques d'imagerie permettent de mesurer l'activité cérébrale, par exemple l'électroencéphalographie, la magnétoencéphalographie, la tomographie par émission de positrons ou encore l'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle (IRMf). Il n'est pas question dans cette section de présenter d'une manière exhaustive les avantages et limites de chacune des techniques. L'objectif est plutôt de justifier le choix de l'IRMf pour mesurer l'implication du contrôle inhibiteur dans les difficultés des élèves à mobiliser les conceptions scientifiques.

Plusieurs techniques d'imagerie permettent de mesurer un signal corrélé de l'activité cérébrale. Le choix d'une technique doit être fait en tenant compte de certaines considérations éthiques. Des techniques comme la tomographie par émission de positrons (Sweet, 1951) qui nécessite l'injection de substances radioactives, la mesure de l'activité individuelle des neurones (Ward, 2015) par l'installation d'électrodes intracrâniennes ou l'application de courants électriques sur le cortex (Fritsch & Hitzig, 2009) ont été exclues d'emblée en raison de leur nature invasive<sup>5</sup>.

En plus des considérations éthiques, le choix d'une technique dépend aussi des objectifs de la recherche, principalement des régions cérébrales à observer et de la tâche cognitive. Pour mesurer l'activité des régions associée au contrôle inhibiteur (le cortex préfrontal ventrolatéral, le cortex préfrontal dorsolatéral et le cortex cingulaire antérieur, voir figure 2.2), il est nécessaire de retenir une technologie ayant une résolution spatiale de l'ordre de quelques millimètres afin de localiser les régions avec

---

<sup>5</sup> Se dit d'un acte médical qui implique le passage à travers le revêtement cutané ou muqueux (Gouvernement du Québec, 2012).

suffisamment de précision. De plus, comme le cortex cingulaire antérieur est une région cérébrale sous-corticale, la technologie choisie doit permettre de mesurer des activations profondes. L'imagerie optique (Maki et al., 1995) est donc exclue puisque sa sensibilité en profondeur, de l'ordre de 5-10 mm, est insuffisante pour détecter l'activation du cortex cingulaire antérieur. Il en est de même pour la magnétoencéphalographie (D. Cohen, 1972). L'électroencéphalographie (Berger & Gloor, 1969) est quant à elle une technique sensible aux activations profondes, toutefois, la localisation de ces activations pose problème en raison de sa faible résolution spatiale.

L'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle (IRMf) (Ogawa et al., 1992) permet quant à elle de localiser des activations, en surface comme en profondeur, et à quelques millimètres près. En contrepartie, l'IRMf possède une résolution temporelle inférieure à d'autres technologies comme l'EEG qui permet de corrélérer le signal à quelques millisecondes près. Toutefois, comme les énoncés de la tâche cognitive développée pour la recherche doctorale ont une durée moyenne de six secondes, la résolution temporelle d'environ deux secondes offerte par l'IRMf est suffisante. De plus, comme cette recherche ne s'intéresse pas à la dynamique temporelle des processus cérébraux impliqués, l'IRMf apparaît être la technique d'imagerie la plus appropriée.

L'IRMf a donc été choisie pour cette recherche bien que cette méthodologie comporte certaines limites principalement liées à la faiblesse du signal mesuré par l'appareil. En effet, dans une recherche en IRMf, il importe de réduire au minimum la variabilité cérébrale associée à des facteurs autres que ceux à l'étude afin d'obtenir une puissance statistique suffisante. La plupart des études contrôlent la préférence manuelle puisque chez les gauchers, la latéralisation des fonctions associées au langage est plus variable, c'est-à-dire qu'elle varie davantage entre l'hémisphère gauche et droit que chez les droitiers (Cai, Van der Haegen, & Brysbaert, 2013). Les gauchers sont donc souvent

exclus pour réduire la variabilité inter-sujets. Ensuite, pour minimiser les différences pouvant être liées à la maturité cérébrale, principalement dans les régions préfrontales (voir p.ex. Caballero, Granberg, & Tseng, 2016), il est recommandé de minimiser l'écart d'âge des participants. De plus, en raison de l'intensité du champ magnétique, les participants portant des implants magnétiques (stimulateur cardiaque, implants métalliques, etc.) doivent être exclus. Par mesure de précaution, les femmes enceintes sont également exclues de la plupart des recherches en IRMf. Enfin, dû à l'espace restreint offert par l'appareil, les participants susceptibles d'éprouver des épisodes de claustrophobie sont exclus.

Néanmoins, l'IRMf est une technique qui offre des avantages non négligeables. Il s'agit d'une technique non invasive qui présente une résolution spatiale suffisamment précise (quelques millimètres) et sa résolution temporelle d'environ deux secondes est également adéquate. Depuis les premières études au début des années 1990 (Ogawa et al., 1992; Ogawa, Lee, Kay, & Tank, 1990a), la technique d'IRMf a gagné en popularité et elle est encore récemment la technique d'imagerie cérébrale la plus utilisée (Smith, 2012). La méthodologie et le paramétrage de l'appareil sont donc bien établis. L'appareil utilisé dans cette recherche est le TRIO TIM de 3 Teslas de Siemens de l'Unité de neuroimagerie fonctionnelle (UNF) de l'Institut universitaire de gériatrie de Montréal.

#### 2.4 L'hypothèse de recherche

Comme mentionné à la section 2.2.3, les recherches qui ont tenté d'établir un lien entre le contrôle inhibiteur et la capacité à mobiliser les conceptions en sciences ont porté sur des participants adultes ayant différents niveaux de formation scientifique. De plus, ces recherches se sont intéressées à un nombre limité de concepts scientifiques (circuits électriques, chute libre, pression des gaz). Le fait que des élèves ayant pourtant profité d'une instruction scientifique comparable éprouvent à des degrés variables des

difficultés conceptuelles demeure insuffisamment compris, notamment au regard de l'implication du contrôle inhibiteur. Jusqu'à maintenant, peu ou aucune recherche ne s'est intéressée au lien entre le contrôle inhibiteur et les difficultés conceptuelles des élèves en sciences. Cette étude propose de vérifier si les élèves ayant plus de difficulté à mobiliser les conceptions scientifiques sous-activent le contrôle inhibiteur par rapport à d'autres ayant plus de facilité.

Il s'avère toutefois difficile de contribuer à mieux comprendre la relation entre ces difficultés et le contrôle inhibiteur à partir d'approches comportementales. L'activation du contrôle inhibiteur peut être masquée par les réponses, scientifiquement correctes, fournies par les élèves, parce que l'inhibition des conceptions spontanées peut se produire de façon inconsciente. Pour vérifier s'il y a ou non activation du contrôle inhibiteur, il n'est donc pas non plus possible de se fier uniquement aux propos auto-rapportés par les participants ou à l'explicitation de leur démarche de raisonnement. Les tests neuropsychologiques, les temps de réponse ou l'amorçage négatif comportent également des limites importantes discutées dans les sections précédentes. Les tests neuropsychologiques ne permettent pas de mesurer l'implication du contrôle inhibiteur au cours d'une tâche. Les temps de réponse et l'amorçage négatif, bien que largement répandus et validés, mènent à des interprétations qui sont largement dépendantes de la qualité de la tâche utilisée et de l'équivalence de la condition contrôle. Une approche basée sur l'utilisation de l'imagerie cérébrale permet de palier à certaines des limites des mesures comportementales et présente l'avantage d'observer l'activation du contrôle inhibiteur en temps réel, c'est-à-dire alors qu'une tâche est réalisée.

Depuis les premières études en neuropsychologie, le cortex préfrontal est connu comme une région cérébrale clé du contrôle inhibiteur. Les études en neuroimagerie montrent que le cortex préfrontal ventrolatéral (CPVL) (p.ex. Aron et al., 2004; Aron et al., 2014a, 2014b) et le cortex préfrontal dorsolatéral (CPDL) (Lie et al., 2006) sont parmi les régions les plus activées pour inhiber une réponse spontanée. À ces régions,

il faut ajouter le cortex cingulaire antérieur (CCA) (Botvinick, 2007) qui serait plus précisément associé à l'instauration d'un état de vigilance permettant la détection d'un conflit.

Cette recherche tente donc de vérifier l'hypothèse selon laquelle les élèves ayant de la difficulté à mobiliser les conceptions scientifiques activent moins que d'autres élèves ayant plus de facilité le contrôle inhibiteur. Selon cette hypothèse, il est donc attendu que les élèves ayant plus de difficultés démontrent une sous-activation des régions cérébrales suivantes par rapport aux élèves ayant plus de facilité, soit le cortex préfrontal ventrolatéral, le cortex préfrontal dorsolatéral, et le cortex cingulaire antérieur.

## CHAPITRE III

### MÉTHODOLOGIE

Ce troisième chapitre a pour objectif de présenter la démarche méthodologique mise en œuvre pour tester l'hypothèse sur la relation entre le contrôle inhibiteur et les difficultés des élèves à mobiliser les conceptions scientifiques. Il présente la démarche d'accès au terrain de recherche et la méthode telle qu'elle a été conçue.

La première section de ce chapitre décrit les critères de sélection des participants, puis la seconde présente l'IRMf comme outil de mesure du contrôle inhibiteur ainsi que la tâche cognitive réalisée par les participants. La troisième section détaille le protocole de collecte de données et en quatrième et cinquième parties, la procédure d'analyse des données comportementales et cérébrales est présentée. Le chapitre se termine par une présentation des considérations éthiques.

#### 3.1 Les participants

L'échantillonnage de cette recherche a permis de former deux groupes d'élèves dont l'un est considéré comme ayant des difficultés à mobiliser les conceptions scientifiques (GrD) et l'autre est considéré comme ayant plus de facilité (GrF). Dans cette section, les critères de sélection des participants de ces deux groupes sont présentés et les stratégies de recrutement sont décrites.

### 3.1.1 L'échantillon et la sélection

La sélection des participants a permis de former un premier groupe composé d'élèves qui sont considérés comme ayant des difficultés conceptuelles. Comme il a été mentionné à la section 1.6, les difficultés conceptuelles sont entendues comme de faibles performances à des tâches de nature conceptuelle en sciences (p.ex. Conseil de la science et de la technologie, 2002), c'est-à-dire des questions de nature qualitative qui ne nécessitent pas l'usage d'outils mathématiques. Bien que la faible performance ne donne pas la certitude que les élèves ont plus de difficulté à mobiliser les conceptions scientifiques, il est raisonnable de le penser, car les questions portent sur des concepts qui leur ont été enseignés au niveau primaire et secondaire (concepts prescrits dans le programme de formation de l'école québécoise) et elles impliquent des conceptions spontanées documentées et répandues. Par hypothèse, ces difficultés observées sont donc attribuées à une moins grande capacité à mobiliser les conceptions scientifiques. Le second groupe est formé d'élèves ayant plus de facilité. Il s'agit d'élèves qui démontrent des performances plus élevées aux tâches de nature conceptuelle en sciences. Par hypothèse, leur meilleure performance est attribuée à une meilleure capacité à mobiliser les conceptions scientifiques.

Comme au Québec plusieurs des concepts scientifiques qui impliquent des conceptions spontanées persistantes (p.ex. en électricité et en mécanique) sont abordés surtout en quatrième et cinquième secondaire, les participants de cette étude sont des élèves finissants de cinquième secondaire. En sélectionnant des participants à la fin de leur scolarité obligatoire, il a été possible d'inclure dans la tâche cognitive (voir section 3.2.2) un plus grand nombre de concepts scientifiques prescrits depuis le primaire et conséquemment d'obtenir des résultats généralisables à plusieurs concepts scientifiques, dont l'astronomie, l'électricité, l'évolution, la génétique, etc. Tous les élèves de l'échantillon étaient donc inscrits aux cours de l'option sciences de cinquième secondaire.

La sélection a été basée sur les scores à une version abrégée du *Misconceptions-Oriented Standards-Based Assessment Resources for Teachers* (voir Annexe A), un questionnaire conceptuel en sciences validé selon la théorie de la réponse à l'item (Sadler, Coyle, Cook-Smith, & Miller, 2007; Sadler, 1998). Ce questionnaire à choix multiples est spécifiquement conçu pour révéler les difficultés conceptuelles des élèves du secondaire. Chacun des trente items du questionnaire concerne un phénomène naturel associé à une conception spontanée répandue et documentée. Pour l'ensemble des 30 items à choix multiples, il était demandé aux élèves de choisir la meilleure réponse parmi les cinq choix proposés. Certains des choix reflétaient la mobilisation d'une conception scientifique, alors que d'autres reflétaient la mobilisation d'une conception spontanée. Par hypothèse, les élèves ayant obtenu les scores les plus faibles, c'est-à-dire inférieurs à 50 %, ont été considérés comme des élèves ayant des difficultés à mobiliser les conceptions scientifiques, alors que les élèves qui ont obtenu les scores les plus élevés, c'est-à-dire supérieurs à 70 %, ont quant à eux été considérés comme ayant plus de facilité à mobiliser les conceptions scientifiques.

Comme il a été mentionné précédemment, dans une recherche en neuroimagerie, il importe de réduire au minimum la variabilité cérébrale associée à des facteurs autres que celui à l'étude afin d'obtenir une puissance statistique suffisante. Dans cette recherche, la préférence manuelle a été contrôlée et seuls les élèves droitiers ont été sélectionnés. Chez les gauchers, la latéralisation des fonctions associées au langage est plus variable (Cai et al., 2013). Comme la tâche cognitive est de nature verbale et peut donc solliciter des aires cérébrales associées au langage, l'inclusion de participants gauchers aurait augmenté la probabilité d'observer une grande variabilité cérébrale. Les gauchers ont donc été exclus pour éviter de diminuer la puissance statistique des analyses. Ensuite, pour minimiser les différences pouvant être liées à la maturité cérébrale (p.ex. Caballero et al., 2016), les participants sélectionnés étaient des adolescents entre 16 et 18 ans.

En plus de tenter de contrôler certains facteurs qui peuvent diminuer la puissance statistique des résultats, la sélection des élèves tient également compte du contrôle de variables potentiellement confondantes pour éviter que les différences d'activité cérébrale observées soient attribuables à des facteurs qui ne concernent pas la capacité des élèves à mobiliser les conceptions scientifiques. Ces critères touchent le niveau de compréhension du français écrit, le niveau socioéconomique et le sexe. Comme la tâche cognitive est constituée d'énoncés verbaux rédigés en français, le niveau de compréhension du français écrit a été maintenu équivalent dans les deux groupes. Pour mesurer cette variable, une version abrégée du test provincial de compétences linguistiques (Office de la qualité et de la responsabilité en éducation OQRE, 2013) a été retenue puisqu'il a été élaboré pour évaluer l'atteinte de la norme minimale en littératie francophone chez les adolescents de 15 ans (voir Annexe B). Les élèves devaient lire deux textes et, pour chacun d'eux, répondre à 11 questions à choix multiple en inscrivant la réponse la plus exacte. Seuls les élèves qui ont obtenu une note supérieure à 90 % (10 bonnes réponses sur 11) ont été sélectionnés dans cette recherche. De plus, étant donné que le niveau socioéconomique peut être associé à des différences d'activation du contrôle inhibiteur (D'Angiulli et al., 2012), l'indice de défavorisation moyen des deux groupes a été contrôlé en se basant sur le code postal des participants (Comité de gestion de la taxe scolaire de l'île de Montréal, 2013). Cette mesure n'est pas aussi précise que le revenu familial, mais elle est préférable à l'indice de défavorisation des écoles. Les deux groupes sont également composés d'un nombre équivalent de participants de sexe masculin et féminin (Cahill, 2006). Enfin, les participants des deux groupes ont reçu une formation scientifique similaire puisqu'ils étaient tous inscrits dans le cours optionnel de physique de cinquième secondaire. Ce dernier critère est expliqué plus en détail à la section 3.1.2.

### 3.1.2 Le recrutement

Des invitations par courriel ont été lancées dans l'ensemble des commissions scolaires ainsi que dans les écoles secondaires privées situées à proximité de l'Unité de neuroimagerie fonctionnelle du Centre de recherche interuniversitaire de gériatrie de Montréal afin de constituer les deux groupes d'élèves contrastés à l'égard de leur capacité à mobiliser les conceptions scientifiques, tout en respectant les critères d'exclusion (préférence manuelle, implants métalliques, etc.) et les critères d'équivalence des groupes (âge, niveau socio-économique, etc.) présentés à la section 3.1.1. Le recrutement a eu lieu entre 8 et 12 semaines avant la séance d'imagerie par résonance magnétique. Au total, 524 élèves provenant de 11 écoles ont rempli les questionnaires de recrutement.

Parmi ces 524 élèves, une soixantaine d'élèves ont été présélectionnés pour faire partie de chacun des groupes. Il s'agit des élèves ayant obtenu les scores les plus faibles, c'est-à-dire inférieurs à 50 % et des élèves qui ont obtenu les scores les plus élevés, c'est-à-dire supérieurs à 70 %. Plusieurs élèves ou parents ont décliné l'invitation en raison de contraintes d'horaire ou de raisons personnelles. D'autres participants ont dû être exclus en raison de contre-indications (p.ex. implants métalliques). Au final, deux groupes de 12 participants ont été retenus pour la recherche. Dans le GrD, le score aux énoncés incongruents<sup>6</sup> de la tâche cognitive (voir section 3.2.2 et voir Annexe C) était, tout comme le score au questionnaire de recrutement, inférieur ou égal à 50 %. Les participants du GrF ont quant à eux obtenu un score d'au moins 60 % aux énoncés incongruents de la tâche cognitive, ce qui est plus moins élevé que le score de 60 % exigé au questionnaire de recrutement. Comme la tâche cognitive était considérablement plus exigeante que le questionnaire de recrutement au regard du

---

<sup>6</sup> Les énoncés impliquant des conceptions spontanées incompatibles avec les conceptions scientifiques (voir la définition donnée à la section 2.2.1).

nombre de concepts abordés (une soixantaine par rapport à une trentaine) et du temps accordé pour répondre qui était limité, il a été décidé de fixer un seuil de réussite plus permissif. Le Tableau 3.1 présente le score (sur 30) au questionnaire de compréhension en sciences utilisé lors du recrutement. Le score est significativement plus élevé chez les élèves du GrF (Médiane= 25) que chez les élèves du GrD (Médiane=13) ( $U= 0,000$ ;  $p< 0,0001$ ) et la taille de l'effet est grande ( $\eta^2= 0,8$ ). Les scores obtenus à la tâche cognitive sont présentés au chapitre suivant (voir section 4.1.1.2). À titre de mesure contrôle, les participants des deux groupes devaient avoir obtenu au minimum 70% aux énoncés congruents de la tâche cognitive (voir section 3.2.2). Cette mesure contrôle permet de minimiser le risque que le faible score des élèves du GrD soit attribuable à d'autres facteurs que la capacité à mobiliser des conceptions scientifiques. Cette précaution permet également de contrôler dans une certaine mesure la capacité de concentration et d'attention entre les deux groupes.

La taille des groupes peut paraître petite. En effet, des statisticiens spécialistes de l'IRMf recommandent de recruter des groupes composés d'une vingtaine de participants (Desmond & Glover, 2002; Murphy & Garavan, 2004) afin d'atteindre 80% de puissance statistique, c'est-à-dire qu'au-delà de 20 participants, les similarités entre les cartes statistiques d'activations cessaient de s'améliorer significativement. Or, bien que ces résultats laissent croire que plupart des études en IRMf, dont celle-ci, qui recrutent typiquement 10 à 20 participants ont une faible puissance statistique, la recherche de Murphy et Garavan (2004) démontre que les cartes d'activation de ces études consistent tout de même en des activations réelles et non de *faux positifs*. Les études menées sur des échantillons de plus petite taille ne produisent donc pas nécessairement des résultats inexacts, mais possiblement moins complets en raison du risque plus élevé de *faux négatifs* (Murphy & Garavan, 2004). De nombreuses recherches recrutent d'ailleurs des groupes inférieurs à 20 participants (p.ex. Brault

Foisy et al., 2015; Grabner et al., 2007; Masson et al., 2014; Simon, Lubin, Houdé, & De Neys, 2015; Stavy, Goel, Critchley, & Dolan, 2006).

La taille de l'échantillon constitue tout de même une limite de cette recherche qui est discutée dans le prochain chapitre (voir section 4.2.3). Toutefois, celle-ci est prise en compte à plusieurs égards. Plusieurs variables potentiellement confondantes ont été contrôlées (voir Tableau 3.1). Aucune différence statistiquement significative n'est observée entre les deux groupes en ce qui concerne le genre ( $\chi^2 = 1,51$ ,  $p = 0,219$ ); l'âge ( $U = 50,000$ ;  $p = 0,219$ ); l'indice de défavorisation ( $U = 43,000$ ;  $p = 0,101$ ) et la compréhension du français écrit ( $U = 48,000$ ;  $p = 0,178$ ). De plus, tous les participants étaient droitiers et aucun n'a déclaré avoir de troubles neurologiques. Enfin, il est important de noter que les analyses à effets aléatoires utilisées dans cette recherche sont des tests statistiques adaptés à des groupes de petite taille. Elles assurent une plus grande généralisabilité des résultats de l'échantillon à la population dont il provient et ce, malgré une taille limitée (Desmond & Glover, 2002).

Tableau 3.1 Profils des deux groupes de participants

	GrF (n = 12)				GrD (n = 12)				Différence (Chi-carré)
Genre	Masculin : 8 Féminin : 4				Masculin : 5 Féminin : 7				$\chi^2 = 1,51$ ; p = 0,219 diff. non significative
	Min	Max	M	É.-T.	Min	Max	M	É.-T.	Différence (Mann-Whitney)
Questionnaire de recrutement (/30)	22	28	25	2	6	15	12	3	U = 0,000; p < 0,0001 $\eta^2 = 0,8$ (grande taille)
Âge (années)	16	18	17	1	16	18	17	1	U = 50,000; p = 0,219 diff. non significative
Indice de défavorisation (1 à 6)	1,0	6,0	3,0	1,5	1,0	6,0	4,1	1,6	U = 43,000; p = 0,101 diff. non significative
Compréhension du français (/11)	10,0	11,0	10,8	0,5	10,0	11,0	10,4	0,5	U = 48,000; p = 0,178 diff. non significative

## 3.2 L'instrumentation

Dans cette section, les modalités d'acquisition des données d'IRMf sont précisées, puis la tâche cognitive est décrite et le protocole de la collecte de données est présenté.

### 3.2.1 L'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle

Pour atteindre son objectif, cette recherche a comparé l'activité cérébrale d'élèves ayant des difficultés à mobiliser les conceptions scientifiques à celle d'élèves ayant plus de facilité. Pour ce faire, cette recherche a utilisé l'IRMf, un outil sécuritaire qui permet de mesurer l'activité cérébrale dans l'ensemble du cerveau. L'IRMf permet d'observer les variations du taux d'oxygénation du sang engendrée par l'activité cérébrale lors de la réalisation de différentes tâches cognitives (Ogawa et al., 1992). Les neurones qui s'activent consomment davantage d'oxygène qui, par une chaîne de réactions biochimiques, est acheminé par les vaisseaux sanguins (Ogawa et al., 1990a).

Lorsque les neurones d'une région cérébrale sont plus activés, la consommation locale d'oxygène fait diminuer le taux d'oxyhémoglobine, un globule rouge porteur d'oxygène, et augmenter le taux de désoxyhémoglobine, un globule rouge départi d'oxygène (Bandettini & Ungerleider, 2001; Ogawa, Lee, Kay, & Tank, 1990b). Pour combler les besoins en oxygène des neurones, les vaisseaux sanguins se dilatent alors et augmentent ainsi le débit sanguin (Ogawa et al., 1990b). Cet afflux sanguin a pour effet d'augmenter la concentration d'oxyhémoglobine tandis que la concentration de désoxyhémoglobine diminue. C'est cette variation que l'appareil d'imagerie détecte.

L'appareil d'IRMf est principalement composé d'un champ magnétique statique de grande puissance et d'une antenne qui permet de détecter le signal (Huettel, Song, & McCarthy, 2004). Ce signal est causé par une perturbation du champ magnétique qui, elle-même, est causée par des variations de la concentration d'oxyhémoglobine et de

désoxyhémoglobine dans le sang des vaisseaux qui irrigue les régions cérébrales. La désoxyhémoglobine est une substance paramagnétique, c'est-à-dire qu'elle perturbe le champ magnétique et diminue par le fait même le signal mesuré par l'appareil d'IRMf (Bandettini & Ungerleider, 2001; Heeger & Ress, 2002). À l'inverse, l'oxyhémoglobine augmente le signal *BOLD*<sup>7</sup> mesuré par l'appareil. Ainsi, suite à l'apport en oxygène (donc en oxyhémoglobine) aux neurones par les vaisseaux sanguins, le signal augmente progressivement et atteint un maximum après 4 à 6 secondes (Birn, Cox, & Bandettini, 2002; Ogawa et al., 1990b). Lorsque l'activité neuronale cesse, les vaisseaux sanguins se contractent et la concentration d'oxyhémoglobine chute. L'amplitude du signal *BOLD* mesuré diminue alors graduellement et retourne éventuellement à un état de nul ou de repos (Huettel et al., 2004).

### 3.2.2 La tâche cognitive

L'IRMf permet de mesurer le signal corrélé avec l'activité cérébrale, c'est-à-dire qu'il permet d'observer les régions cérébrales activées lors de la réalisation d'une tâche cognitive ou motrice. L'utilisation de l'IRMf s'accompagne toutefois de certaines contraintes dont il faut tenir compte lors de la conception d'une tâche cognitive (Amaro & Barker, 2006; Ward, 2015). Premièrement, en raison du bruit émis par l'appareil, il est généralement recommandé d'utiliser des tâches visuelles qui seront présentées au participant à partir d'un écran d'ordinateur reflété sur un miroir. Ensuite, comme les participants doivent être en position allongée et demeurer immobiles, il est préférable de poser des questions à choix multiples auxquelles les participants peuvent répondre en appuyant sur des boutons. De plus, comme la variation de l'activité cérébrale mesurée peut représenter moins de 2 % du signal, il est essentiel de présenter plusieurs

---

<sup>7</sup> *Blood-oxygen-level-dependent*

stimulus de chacune des conditions de la tâche cognitive afin d'obtenir une puissance statistique suffisante.

De plus, le protocole doit tenir compte du délai de la réponse hémodynamique. En effet, comme mentionné à la section 3.2.1, lorsqu'une région du cerveau s'active, l'activité métabolique des neurones entraîne un accroissement des besoins en oxygène et nutriments et conséquemment, l'afflux sanguin augmente localement de même que la quantité de sang oxygéné. Cette modification de la quantité de sang oxygéné varie donc en fonction de l'activité neuronale de la région cérébrale impliquée, mais il y a un délai de quelques secondes (appelé délai de la réponse hémodynamique) entre l'activité cérébrale et la mesure du signal causé par la variation de sang oxygéné. La réponse hémodynamique met en jeu des processus physiologiques complexes qui résultent un phénomène lent et progressif (Faillenot, 2014). Suite à la présentation d'un stimulus, le patron de variation du signal augmente donc progressivement jusqu'à son déclin progressif quelques secondes après. En raison de ce délai de la réponse hémodynamique (Buxton, Uludağ, Dubowitz, & Liu, 2004), il importe d'inclure des pauses d'une longueur suffisante afin de laisser le temps au signal de redescendre entre les stimulus de différentes conditions.

La tâche cognitive utilisée dans cette recherche est inspirée la tâche développée par Shtulman & Valcarcel (2012) (voir Annexe C). Elle requiert d'évaluer si des énoncés concernant des phénomènes naturels sont scientifiquement corrects (voir des exemples au Tableau 3.2). Au total, plus de 17 thèmes sont abordés, dont l'évolution, la génétique, la matière, l'astronomie et l'énergie. Les domaines retenus impliquent les conceptions spontanées parmi les plus répandues et persistantes (Wandersee et al., 1994). L'inclusion d'une diversité de domaines vise à assurer une certaine représentativité des concepts scientifiques prévus dans les programmes scolaires du primaire et du secondaire.

Tableau 3.2 Exemple d'énoncés congruents et incongruents (V= vrai; F= faux)

Domaine	Condition	
	Congruente	Incongruente
Évolution	Le singe descend de l'être humain. (F)	L'être humain descend du singe. (F)
Énergie	Un feu de camp contient de l'énergie thermique. (V)	Un glaçon contient de l'énergie thermique. (V)
Écosystèmes	Une substance synthétique peut être toxique. (V)	Une substance naturelle peut être toxique. (V)
Matière	Un gramme de styromousse est plus lourd qu'un gramme de fer. (F)	Un gramme de fer est plus lourd qu'un gramme de styromousse. (F)

Afin d'être inclus dans la tâche, les énoncés devaient porter sur des concepts prescrits dans le Programme de formation de l'école québécoise dans le domaine de la science et de la technologie (Gouvernement du Québec, 2006b, 2006c, 2007a, 2007c, 2007d). Les énoncés appartiennent à l'une ou l'autre de deux conditions : congruente ou incongruente et sont organisés en paires pour mieux assurer l'équivalence des conditions. Le premier énoncé d'une paire est congruent, c'est-à-dire compatible à la fois avec la conception spontanée et la conception scientifique. Pour ces énoncés, il n'y a pas donc pas de compétition entre différentes conceptions et, par conséquent, pour produire une réponse scientifiquement appropriée la conception spontanée suffit. Le deuxième énoncé est incongruent, c'est-à-dire incompatible avec la conception spontanée du phénomène. Pour ces énoncés, il y a donc compétition entre différentes conceptions et, par conséquent, pour produire une réponse scientifiquement appropriée, il est, par hypothèse, présumé qu'il est nécessaire de mobiliser la conception scientifique du phénomène. Pour chacune des conditions (congruente et incongruente), le nombre d'énoncés où la réponse scientifiquement appropriée correspond à « vrai »

est équivalent au nombre d'énoncés où la réponse scientifiquement appropriée correspond à « faux ».

Chacune des paires d'énoncés a été construite à partir d'une conception spontanée rapportée dans au moins une étude empirique qui démontre que cette conception est répandue chez les élèves. Par exemple, l'énoncé « Un glaçon contient de l'énergie thermique. » est considéré comme incongruent. Pour cet énoncé, il est présumé qu'une compétition se produit entre la conception spontanée voulant que « la chaleur est la sensation de ce qui est chaud » et la conception scientifique à l'effet que « tout ce qui est à une température supérieure à 0 degré K possède de l'énergie ». En effet, pour donner une réponse scientifiquement appropriée (vrai), la conception spontanée ne suffit pas. Il est plutôt présumé qu'il est nécessaire de mobiliser la conception scientifique du phénomène.

À chacun des énoncés incongruents est associé un énoncé congruent où cette fois, la conception spontanée est compatible avec la conception scientifique. Par exemple, l'énoncé « Un feu contient de l'énergie thermique. » est considéré congruent. Celui-ci ne mène pas à une compétition entre différentes conceptions, car la conception spontanée suffit à formuler une réponse scientifiquement appropriée (vrai). Il n'est donc pas nécessaire de mobiliser la conception scientifique du phénomène. En plus d'être une mesure contrôle du point de vue comportemental (voir section 3.1.2), la condition congruente permet de comparer comment l'activité cérébrale des deux groupes diffère selon qu'ils répondent à des énoncés incongruents ou congruents. Elle permet également d'éviter que la tâche soit trop répétitive ou trop exigeante.

Les paires d'énoncés congruents et incongruents traitent du même concept scientifique et sont équivalentes au niveau du nombre de mots, de la mesure de lisibilité (Kandel & Moles, 1958) et du niveau d'analyse microscopique ou macroscopique. Par exemple, si un énoncé congruent traite du concept microscopique de la cellule, l'énoncé

équivalent incongruent traite également d'un phénomène microscopique. De plus, les fréquences du type de réponse « vrai » et « faux » sont similaires dans les deux conditions. Parmi les 64 énoncés congruents, 31 d'entre eux possèdent une réponse scientifiquement appropriée de type « vrai » alors que 33 possèdent une réponse scientifiquement appropriée de type « faux ». L'inverse se produit pour les 64 énoncés de la condition incongruente où 33 énoncés possèdent une réponse scientifiquement appropriée de type « vrai » alors que 31 possèdent une réponse scientifiquement appropriée de type « faux ». Les fréquences des types de réponses ne sont pas parfaitement identiques (ce qui aurait représenté 32 énoncés de chaque type) en raison de compromis qui ont dû être faits pour respecter les autres critères (diversité des concepts scientifiques, lisibilité, etc.).

### 3.2.3 Le protocole expérimental

Les énoncés de la tâche cognitive ont été présentés selon un protocole en bloc (Birn et al., 2002; Mechelli, Henson, Price, & Friston, 2003) qui consiste à regrouper un certain nombre d'énoncés d'une même condition pendant 20 à 30 secondes, puis à insérer une période de repos de quinze secondes avant la présentation du prochain bloc. Les blocs ont été présentés dans un ordre aléatoire et regroupés en quatre séries (voir Figure 3.1). En plus des quatre blocs congruents et des quatre blocs incongruents, deux blocs mixtes contenant à la fois des énoncés congruents et incongruents étaient insérés dans chacune des séries. Les blocs mixtes visaient à déjouer les participants qui auraient pu avoir tendance à reconnaître les conditions de la tâche. Au sein de chacun des blocs, les énoncés ont aussi été présentés aléatoirement.

Chaque énoncé était présenté jusqu'à ce que le participant réponde ou pour une durée maximale de dix secondes. Les participants appuyaient avec l'index de la main droite pour indiquer qu'un énoncé était scientifiquement correct (vrai), et sur le majeur de la main droite pour indiquer qu'un énoncé était scientifiquement incorrect (faux) (voir

figure 3.1). Lorsque les participants appuyaient sur le bouton, le prochain énoncé du bloc était présenté jusqu'au quatrième énoncé du bloc après quoi une pause de 15 secondes était insérée. Dans le cas où aucune réponse n'était donnée, le prochain énoncé ou la période de pause était présenté. La tâche était d'une durée moyenne de 30 minutes. Elle comprenait au total quatre séries équivalentes composées au total de 40 blocs formés de 160 énoncés différents. En retirant les blocs mixtes qui ne font pas partie de l'analyse des données, il en résulte 32 blocs et 128 énoncés congruents et incongruents.

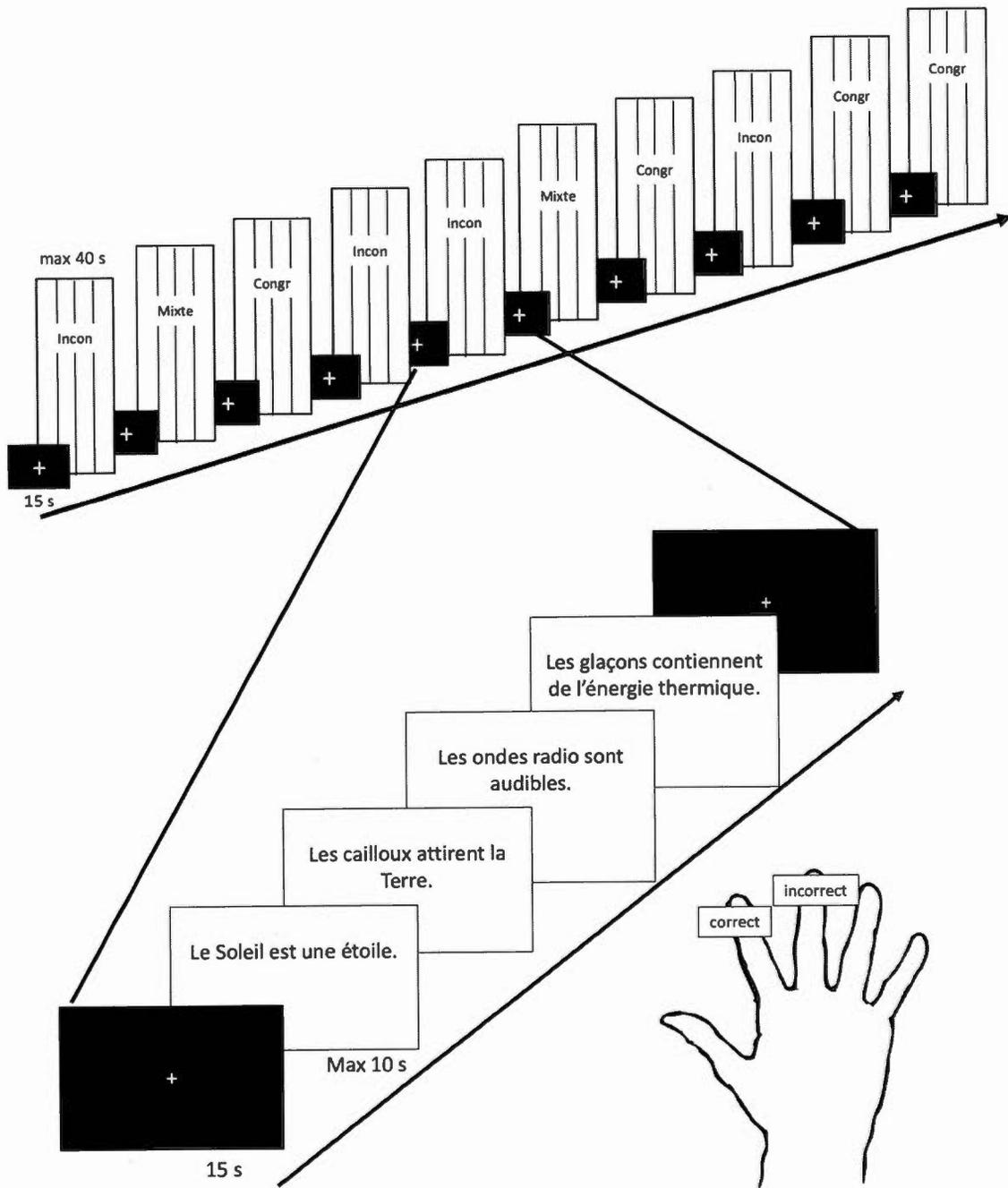


Figure 3.1 Exemple d'une série et d'un bloc (incongruent)

### 3.3 Le déroulement

Cette section présente le déroulement des séances d'IRMf auxquelles les participants ont pris part.

#### 3.3.1. Les consignes et la simulation

Une fois sélectionnés, les participants ont été invités à une séance d'IRMf. L'expérimentateur devait d'abord obtenir le consentement écrit des participants et du responsable légal dans le cas de personnes mineures (voir Annexe D et Annexe E). Ensuite, il devait confirmer que le participant n'avait pas de contre-indication à prendre part à une séance d'IRMf à l'aide du formulaire de dépistage pour étude en IRM (voir Annexe F). Les principales contre-indications concernent la présence d'implants métalliques incompatibles avec l'appareil d'IRMf comme les simulateurs cardiaques, les prothèses orthopédiques ou les débris métalliques accidentels (accidents de la route, incidents industriels ou autre). Les participants de sexe féminin devaient en plus se prêter à un test de grossesse avant la réalisation de l'imagerie par résonance magnétique. Le résultat négatif du test de grossesse était une condition pour participer à l'expérimentation. Le personnel technique de l'Unité de neuroimagerie fonctionnelle (UNF) était ensuite chargé d'approuver l'admissibilité des participants.

Suite à la signature du formulaire de consentement et du dépistage des contre-indications, le déroulement général de la séance était présenté aux participants. Ceux-ci étaient informés qu'ils allaient d'abord prendre part à une séance de simulation. Le simulateur d'IRM est une réplique inerte de l'appareil de résonance magnétique, c'est-à-dire sans champ magnétique. Le simulateur permet aux participants de s'acclimater à l'environnement de l'IRM qui est caractérisé par un espace restreint, la présence de bruit ainsi que la nécessité d'être en position allongée et immobile (voir figure 3.2). La séance de simulation permet de réduire les risques de mouvement et par conséquent

améliore en général la qualité des images acquises par l'appareil d'IRMf (De Bie et al., 2010). De plus, elle permet aussi de réduire les risques d'anxiété et de familiariser les participants avec les consignes avant l'acquisition des images.



Figure 3.2 Exemple de simulateur d'appareil d'IRMf (Penn State University, 2015)

La tâche de pratique utilisée lors de la simulation comprenait une quinzaine d'énoncés semblables aux énoncés de la tâche cognitive. Comme les énoncés étaient différents de ceux utilisés dans l'expérimentation, il n'y avait pas de risque de contamination ou d'effet test-retest. Afin de s'assurer de l'uniformité des consignes données aux participants, l'expérimentateur devait se conformer à un protocole de collecte (voir l'ensemble des consignes à l'étape 3 à l'Annexe H).

Après avoir confortablement installé le participant à l'ordinateur, l'expérimentateur devait lire à l'écran la consigne suivante : « Déterminer si les énoncés suivants sont scientifiquement corrects ou incorrects. » Puis, il indiquait au participant que pour répondre « correct » ou « vrai » il fallait appuyer sur le bouton de gauche (index de la main droite), alors que si l'énoncé était « incorrect » ou « faux » il fallait appuyer sur

le bouton de droite (majeur de la main droite). L'expérimentateur informait le participant qu'il avait au plus 10 secondes pour répondre à chacun des énoncés et qu'il était demandé de répondre le mieux, mais aussi le plus rapidement possible. Le participant était aussi informé que les énoncés seraient présentés dans un ordre aléatoire. Une fois la tâche de pratique réalisée une première fois à l'ordinateur, l'expérimentateur installait confortablement le participant dans le simulateur. Puis, il lisait à nouveau les consignes et rappelait au participant qu'il était important de rester immobile. L'expérimentateur demandait alors au participant de réaliser une deuxième fois la tâche de pratique et encourageait le participant à demeurer immobile, surtout au niveau de la tête. Suite à la pratique, l'expérimentateur faisait entendre au participant le bruit de l'appareil d'IRMf. L'expérimentateur raccompagnait ensuite le participant dans la salle d'attente pendant les quelques minutes servant à préparer la salle d'IRMf. Il profitait de ce moment pour répondre, si c'était le cas, aux questions du participant et expliquer les trois étapes de la séance d'IRMf : un localisateur d'environ 15 secondes; 4 blocs de la tâche entrecoupés de pauses d'une à deux minutes et un scan anatomique d'environ 10 minutes au repos.

### 3.3.2 L'acquisition des images

Les données ont été recueillies à l'aide d'un appareil *Siemens* TIM 3,0 Tesla. L'utilisation d'un tel appareil s'accompagne de certaines contraintes, toutefois, il est possible d'en atténuer les effets en prenant les précautions nécessaires. Lors de l'acquisition des images, les participants étaient installés sur le lit de l'appareil d'IRMf qui se déplace dans un tunnel ouvert de chaque côté et ventilé. Dû au bruit généré par l'appareil, des bouchons et des coussins étaient installés aux oreilles du participant. Un casque d'écoute permettait à l'expérimentateur de communiquer avec le participant à partir de la salle de contrôle adjacente. Le participant avait également accès à un arrêt d'urgence qu'il pouvait utiliser pour arrêter la séquence en cas de problème. Pour assurer le confort du participant, des coussins étaient placés sous les genoux et les

coudes et il était recouvert d'une couverture. Une fois le participant positionné, des coussins étaient placés de chaque côté de sa tête de façon à minimiser le mouvement. L'expérimentateur s'assurait aussi que le participant n'éprouvait pas d'inconfort et qu'il arrivait facilement à voir le miroir sur lequel est reflété l'écran où étaient présentés les énoncés de la tâche cognitive.

Tout au long de la séance, l'expérimentateur avait la responsabilité de s'assurer du confort et de la sécurité du participant à partir de la salle de contrôle d'où l'appareil est visible. Lors des pauses, il parlait au participant à l'aide du casque d'écoute afin de vérifier qu'il n'éprouvait pas d'inconfort. L'expérimentateur veillait aussi à rappeler au participant la progression de la séance et annoncer l'étape à venir. Enfin, il rappelait au participant l'importance de demeurer immobile et le félicitait pour ces efforts en ce sens.

La séance d'IRMf s'est déroulée en deux principales étapes. Dans un premier temps, les participants réalisaient la tâche cognitive. Les énoncés des 10 blocs de la première série étaient présentés aléatoirement (4 blocs congruents, 4 blocs incongruents et 2 blocs mixtes). Au sein de la série, une pause (croix de fixation) s'affichait entre chaque bloc de 4 énoncés afin de permettre à l'activité cérébrale de redescendre. Les images fonctionnelles ( $T2^*$  *spin echo*) étaient acquises selon les paramètres présentés à l'Annexe G. Les trois séries suivantes se déroulaient de la même façon pour un total de 32 blocs incongruents et 32 blocs congruents. En incluant les pauses entre les séries, la tâche était d'une durée d'environ 30 minutes. Dans un deuxième temps, alors que les participants étaient au repos, les images anatomiques ( $T1$ ) étaient acquises selon les paramètres présentés à l'Annexe G. Les images anatomiques permettent de localiser les activations cérébrales et sont essentielles au prétraitement des données décrit à la section 3.5. L'acquisition de ces images anatomiques s'étalait sur environ neuf minutes.

En IRMf que les images anatomiques sont acquises indépendamment des images fonctionnelles. Les deux types d'images reposent sur des contrastes différents (Huettel et al., 2004). Le contraste T1 est souvent utilisé pour recueillir des informations quant à l'anatomie du cerveau. Il permet une haute résolution spatiale et fournit une image précise de la morphologie du cerveau, toutefois sa résolution temporelle est faible. Quant au contraste T2, il est souvent utilisé pour recueillir des informations relatives au fonctionnement du cerveau. Il permet une haute résolution temporelle et détecte le signal corrélé de l'activité cérébrale et d'une tâche cognitive, néanmoins, sa résolution spatiale est faible. Les images fonctionnelles sont donc acquises pendant la tâche cognitive, en temps réel, alors que les images anatomiques sont générées en différé. Lors de l'analyse des données, un recalage, ou mise en correspondance, des images anatomiques et fonctionnelles est effectué afin de pouvoir combiner leurs informations respectives.

#### 3.4 L'analyse des données comportementales

Les analyses ont pour objectif de vérifier si les élèves ayant des difficultés à mobiliser les conceptions scientifiques activent moins que d'autres, ayant plus de facilité, le contrôle inhibiteur. Les données relatives aux taux de réussite et aux temps de réponses à la tâche cognitive ont été traitées à l'aide du logiciel *Statistical Package for the Social Sciences (SPSS 24)* (IBM Corp, 2016). D'abord, les données extrêmes ont été identifiées, puis écartées des analyses. Une analyse de variance (ANOVA) des facteurs (1) congruence (congruent et incongruent) et (2) groupe (GrD et GrF) a été réalisée sur les taux de réussite et sur les temps de réponse afin de vérifier l'effet des deux facteurs et de leur interaction sur les résultats. Ensuite, pour confirmer le sens des effets observés, une comparaison de groupe (test de Mann-Whitney) a été effectuée sur les taux de réussite moyens afin de vérifier l'existence d'une différence significative entre les deux groupes et une taille de l'effet importante (Gignac & Szodorai, 2016).

Une comparaison de groupe (test de Mann-Whitney) a également été réalisée sur les temps de réponse afin de comparer la différence entre le temps de temps de réponse aux énoncés incongruents et congruents entre les deux groupes. Si l'écart entre les temps de réponse aux énoncés incongruents et congruents s'avère plus important chez les élèves du GrF, il s'agirait d'un indice qu'ils ont eu recours à une étape de traitement de l'information supplémentaire ou à un raisonnement plus complexe, possiblement le contrôle inhibiteur. Une comparaison des conditions congruente et incongruente (test de Mann-Whitney pour échantillons appariés) a de plus été réalisée sur les temps de réponse des énoncés réussis dans le GrF. Les énoncés échoués ont été exclus de cette analyse afin de pouvoir observer si la réussite des énoncés incongruents était associée à un temps de réponse plus long que la réussite des énoncés congruents. Un temps de réponse plus long aux énoncés incongruents réussis qu'aux énoncés congruents réussis serait également un indice du recours au contrôle inhibiteur. Cette comparaison n'a pas été réalisée dans le GrD, car les énoncés incongruents réussis sont trop peu nombreux.

Toutefois, comme discuté précédemment, l'étude du temps de réponse comporte certaines limites. L'étude du contrôle inhibiteur par temps de réponse permet de repérer des différences dans le raisonnement nécessaire pour répondre à différents types d'énoncés, mais elle ne nous indique pas précisément la nature de cette différence. Il est par exemple possible que le contrôle inhibiteur du GrF s'active rapidement et ne soit pas nécessairement accompagné d'un temps de réponse significativement plus long. De plus, en ne conservant que les réponses réussies, il est possible que les conditions congruente et incongruente de la tâche cognitive soient moins équivalentes. Par conséquent, des différences dans les temps de réponse peuvent être dues à des variables confondantes comme le temps de lecture des énoncés. Par conséquent, ces résultats sont interprétés avec prudence et dans une perspective de complémentarité avec les données d'imagerie cérébrale.

### 3.5 L'analyse des données cérébrales

Les données cérébrales ont ensuite été analysées à l'aide du logiciel *Statistical Parametric Mapping (SPM8)* (Functional Imaging Laboratory, 2017), l'un des logiciels les plus utilisés en neuroimagerie (Pauli et al., 2016). L'analyse s'est déroulée en deux temps : (1) les prétraitements (correction du mouvement, lissage et normalisation) ainsi que (2) le traitement statistique des données. Cette deuxième étape est basée sur une analyse à effets aléatoires qui permet de rendre les résultats généralisables à l'ensemble de la population à l'étude. L'analyse statistique principale a consisté, à partir d'une ANOVA à plan factoriel et de comparaisons de groupe (test-t), à comparer comment l'activité cérébrale des deux groupes diffère lorsque qu'ils répondent à des énoncés incongruents par rapport à congruents.

#### 3.5.1 Le prétraitement des données

Avant de procéder à l'analyse des données cérébrales, trois étapes de prétraitement ont été réalisées. Les prétraitements permettent de corriger au mieux les erreurs qui peuvent être introduites dans les données par la technique d'IRMf ainsi que de préparer les données à des comparaisons de groupe.

##### 3.5.1.1 La correction du mouvement

D'abord, une correction du mouvement a été effectuée puisque malgré les précautions prises (voir section 3.3), le positionnement de la tête peut varier légèrement au cours de l'acquisition des images. S'ajoutent à cela les mouvements oculaires et ceux dus à la respiration et la déglutition qu'il est impossible de prévenir (Poldrack, Mumford, & Nichols, 2011). Les mouvements peuvent avoir des effets indésirables comme d'entraîner le déplacement de la position des régions activées. Ce déplacement peut créer des artefacts, c'est-à-dire des données qui ne résultent pas des facteurs expérimentaux ou des variables à l'étude, qui peut augmenter le risque de faux positifs

où une région est considérée à tort comme étant significativement activée.

Les logiciels d'analyse, dont le logiciel *SPM8* utilisé dans cette recherche, proposent une procédure assez standard de correction du mouvement (Huettel *et al.*, 2008; Poldrack *et al.*, 2011). L'algorithme utilisé est celui de Friston, Williams, Howard, Frackowiack et Turner (1996). Lors de cette procédure couramment utilisée, les images acquises pour chacun des participants ont été ajustées afin que la tête soit positionnée de la même façon pour l'ensemble de la séance d'IRMf. L'algorithme considère le cerveau comme un objet rigide et applique des transformations spatiales selon six paramètres dont trois liés aux translations en x, y et z et trois liés aux angles possibles de rotation de la tête afin d'aligner les images par rapport à l'image de référence qui elle, demeure telle quelle. Dans cette recherche, l'image moyenne a été utilisée comme référence.

La transformation, souvent qualifiée de « recalage » ou « réalignement » (Huettel et al., 2004), a consisté plus précisément à estimer les paramètres de mouvement en comparant l'image à corriger et l'image de référence. Les paramètres ont été calculés de façon à effectuer la plus petite transformation possible (*cost function*). Une fois ce calcul effectué, la transformation géométrique de l'image a été effectuée. À la suite de la correction, une inspection visuelle a été réalisée chez les participants dont les paramètres de mouvement étaient supérieurs à 2 mm (x, y, z) ou à 2° (rotation de la tête) afin de vérifier s'il subsiste des déplacements importants d'une image à l'autre.

### 3.5.1.2 La normalisation

Comme l'objectif de cette recherche est d'identifier les différences entre deux groupes, les images cérébrales des participants d'un même groupe doivent être combinées entre elles au sein d'un espace commun, standard et en trois dimensions. En effet, il existe des différences anatomiques considérables entre la morphologie (taille et forme) du

cerveau de différents individus (Huettel et al., 2008; Poldrack et al., 2011). Par conséquent, pour arriver à comparer les activations cérébrales de plusieurs participants, il a été nécessaire de procéder à une normalisation des volumes cérébraux. La normalisation vise à transformer les images cérébrales des participants pour que les régions cérébrales se correspondent, mais tout en respectant la variabilité anatomique (Poldrack et al., 2011). Cette procédure permet, par une série d'opérations mathématiques d'optimisation, de compenser pour les différences morphologiques en étirant, rapetissant ou remodelant les images cérébrales de chacun des participants d'un échantillon. La normalisation permet donc d'établir une correspondance de chacune des régions entre les cerveaux de plusieurs individus.

Les données de cette recherche ont été normalisées selon la procédure de segmentation développée par Ashburner et Friston (2005). La procédure permettant d'accomplir la normalisation repère les contours d'une image de référence et les contours des images du cerveau à transformer, puis applique une série de transformations sur les images. Le cerveau de référence utilisé est un volume dérivé du *MNI Average Brain (MNI152 - Linear ICBM Average Brain (ICBM152) Stereotaxic Registration Model)* du *Montreal Neurological Institute* qui consiste en un cerveau moyen produit à partir de 152 images anatomiques pondérées (T1) (Mazziotta, Toga, Evans, Fox, & Lancaster, 1995). Le référentiel du MNI est considéré comme étant actuellement le plus utilisé dans les études en neuroimagerie (Poldrack et al., 2011).

### 3.5.1.3 Le lissage

Enfin, pour améliorer le rapport signal sur bruit, le lissage des données a été effectué. Cette procédure consiste à répartir le signal de chacun des voxels<sup>8</sup> activés du cerveau

---

<sup>8</sup> Voxel provient de la contraction de « *volume* » et « *element* » ). Il s'agit d'un pixel en 3D.

sur les voxels environnants à partir d'une fonction gaussienne afin que les données soient normalement distribuées et ainsi pouvoir réaliser les analyses statistiques paramétriques (Huettel et al., 2008; Poldrack et al., 2011). Le lissage permet de réduire les risques de faux positifs en répartissant le signal ou l'activité d'un voxel du cerveau aux voxels voisins. Par conséquent, un voxel qui ne serait pas ou peu activé, mais qui serait situé dans une région cérébrale où tous les voxels voisins sont fortement activés deviendrait lui aussi plus activé après le lissage. À l'inverse, un voxel fortement activé, mais situé dans une région où aucun voxel voisin n'est très activé présenterait un signal moins élevé à la suite du lissage. L'activité de certains voxels peut donc être renforcée ou réduite, selon l'activation des voxels environnants (Ward, 2010).

Le lissage permet donc de faciliter la détection des régions activées en renforçant la valeur des voxels fortement activés entourés de voxels qui sont eux aussi fortement activés. Il diminue aussi les risques de considérer les artéfacts, des activations non attribuables à la tâche cognitive, comme des régions cérébrales étant significativement activées. Étant donné que la majorité des activations cérébrales sont constituées de plusieurs voxels, les gains associés à une augmentation du signal lorsque plusieurs voxels voisins sont activés surpassent les pertes des plus petites activations. De plus, cette procédure est particulièrement utile pour comparer les activations cérébrales de plusieurs individus, car elle permet d'atténuer les différences mineures (non significatives) entre les images normalisées des participants qui n'ont pas été corrigées par les prétraitements.

Les études en IRMf utilisent généralement un filtre gaussien allant de 6 mm à 10 mm de la moitié de la hauteur maximale - *full-width-half-maximum (FWHM)*, ce qui correspond environ à la taille de 2 à 3 voxels (chaque côté d'un voxel mesure 3mm, voir Annexe G) (Huettel et al., 2008; Thirion et al., 2006). Le filtre gaussien utilisé dans cette recherche suit ces recommandations et il a été fixé à 8 mm *FWHM*. En prenant un filtre plus large que les recommandations, certaines activations pourraient

être trop atténuées et ne pas être statistiquement significatives. À l'inverse, un filtre plus petit la résolution spatiale des données. Il semble donc qu'à la lumière de connaissances actuelles un filtre de 8mm *FWHM* représente le meilleur équilibre.

### 3.5.2 Le traitement des données

Pour déterminer comment l'activité cérébrale des deux groupes varie selon qu'ils répondent à des énoncés congruents ou incongruents, il a d'abord été nécessaire de calculer la moyenne des résultats de chacun des participants à partir d'une analyse à effet fixe qui tient compte uniquement de la variabilité intra-individuelle (Huettel et al., 2008). Cette analyse permet d'obtenir une carte statistique globale de l'activité cérébrale de chacun des participants. Ensuite, à partir des cartes statistiques moyennes de chacun des participants, une analyse de groupe à effets aléatoires a été réalisée. Cette analyse a combiné la moyenne de l'activité cérébrale de tous les participants inclus dans un groupe au sein d'un contraste. Enfin, les analyses statistiques (ANOVA à plan factoriel et tests-t) ont été réalisées.

#### 3.5.2.1 Les analyses à effets fixes et à effets aléatoires

En IRMf, l'objectif est d'étudier l'activation des voxels en fonction du temps afin de détecter une corrélation entre les variations du signal mesuré (signal *BOLD*) et les conditions expérimentales de la tâche (Poldrack et al., 2011). Les analyses ont donc été appliquées à chaque voxel du cerveau de façon indépendante, en se basant sur des hypothèses *a priori* quant à la forme du signal mesuré. Dans ce type d'analyse dit univarié, le signal *BOLD* est la variable dépendante et les différents facteurs de l'expérimentation constituent les variables indépendantes. Dans cette recherche, il s'agit des conditions de la tâche cognitive : congruente et incongruente. Le modèle linéaire général est la technique univariée la plus répandue (Smith, 2004) en IRMf et il s'agit du modèle utilisé dans cette recherche.

Une fois les données prétraitées, des analyses à effets fixes ont d'abord été réalisées sur la base du modèle linéaire général (Huettel et al., 2004) qui repose sur le postulat selon lequel il est possible d'estimer ou de prédire la valeur des données observées en combinant, de façon linéaire, plusieurs facteurs associés à différentes pondérations ainsi qu'une valeur d'erreur (voir équation 1). La pondération des facteurs indique dans quelle mesure ceux-ci contribuent à la variance des données.

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_n x_n + \varepsilon \quad (1)$$

Dans le modèle général linéaire,  $y$  représente les données expérimentales qui sont observées,  $X$  représente un facteur,  $\beta$  constitue la pondération de ce facteur et  $\varepsilon$  symbolise l'erreur (c'est-à-dire la variabilité des données que le modèle ne permet pas d'expliquer).

Certains facteurs (ou régresseurs) inclus dans le modèle sont manipulés par l'expérimentateur (régresseurs d'intérêt), alors que d'autres régresseurs ne sont pas liés aux facteurs d'intérêt pour l'étude (régresseurs sans intérêt). Dans cette recherche, les régresseurs d'intérêt sont les conditions de la tâche cognitive (congruent et incongruent). Les régresseurs sans intérêt sont quant à eux liés à la dérive temporelle du signal de l'appareil d'IRMf aux paramètres du mouvement. Par la méthode des moindres carrés, il a été possible d'obtenir les pondérations ( $\beta$ ) de chacun des facteurs qui permettent de minimiser l'erreur ( $\varepsilon$ ). Cette méthode est appliquée à chacun des voxels du cerveau et ainsi, plus la pondération ( $\beta$ ) est élevée, plus l'activité d'un voxel donné réagit au facteur ou à la condition associée à ce beta. Au final, une matrice comprend les valeurs de tous les voxels (voir équation 2).

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

L'analyse à effets fixes réalisée a donc permis d'extraire les activations relatives aux quatre séries de chacun des participants où la variance utilisée, c'est-à-dire la variabilité sur laquelle repose cette étape, est la variance intra-série. Une deuxième étape permet ensuite d'attribuer un poids à chaque série et d'obtenir l'activité de chaque sujet pour chacune des conditions toutes séries confondues.

Or, les analyses à effets fixes ne prennent en compte que la variabilité intra-individuelle (Huettel et al., 2008; Poldrack et al., 2011), c'est-à-dire qu'il est présumé que l'effet de chacune des conditions est constant chez tous les participants et que les différences observées entre leurs réponses hémodynamiques seraient uniquement attribuables à du bruit (Smith, 2004). Ce type d'analyse ne tient pas compte de la variabilité entre les participants. Par conséquent, les résultats sont généralisables à l'échantillon, mais pas à la population. Ils sont d'ailleurs sensibles aux données extrêmes.

Pour généraliser les résultats à la population, il est nécessaire d'utiliser ensuite une analyse à effets aléatoires qui prend en compte la variabilité inter-individuelle en plus de la variabilité intra-individuelle (Poldrack et al., 2011). Ce type d'analyse est adapté à la comparaison de groupes de petite taille, notamment car elle assume que des différences individuelles peuvent exister en plus de l'effet des facteurs à l'étude (Huettel et al., 2008). L'analyse à effets aléatoires élimine d'abord les différences entre les participants avant de tester les facteurs expérimentaux et seuls les effets qui sont observés en moyenne pour tous les participants pourront contribuer à produire un effet significatif. Elle permet donc de déterminer l'activité cérébrale moyenne de chaque groupe pour ensuite pouvoir réaliser des comparaisons à l'aide de tests statistiques (p.ex. test-t, ANOVA, etc.). Suite aux analyses à effets fixes, une analyse à effets aléatoires a donc été réalisée pour combiner les résultats et obtenir une carte

d'activation par participant et par condition en plus des cartes d'activations combinées pour chacun des deux groupes et chacune des deux conditions. Les cartes statistiques représentent la moyenne des variations du signal mesuré dans chacun des voxels pour l'une ou l'autre des conditions de la tâche cognitive. Les résultats ont ensuite été soumis à des tests statistiques pour mesurer l'effet d'interaction et les contrastes simples.

### 3.5.2.2 Les tests statistiques

Les tests statistiques utilisés sont présentés dans les prochaines sous-sections. Il s'agit de l'ANOVA à plan factoriel et des tests-t.

#### **ANOVA à plan factoriel**

Déterminer comment l'activité cérébrale des deux groupes d'élèves varie selon qu'ils répondent à des énoncés congruents ou incongruents nécessite un modèle statistique qui permet de mesurer l'effet d'interaction entre deux variables indépendantes. L'ANOVA à plan factoriel permet de tester l'effet de deux variables indépendantes catégorielles (facteurs) attribuées aux participants des deux groupes sur une variable dépendante (VD) à l'intérieur d'une seule analyse ou d'un seul modèle. Son équation peut s'écrire (Penny & Henson, 2007):

$$y_{nkl} = \tau_{kl} + \pi_n + e_{nkl} \quad (3)$$

où  $k= 1, 2$  et  $l= 1, 2$  représentent respectivement les deux niveaux du facteur A (groupe) et du facteur B (congruence),  $n$  représente le nombre d'observations (1 à 24),  $\tau$  représente l'effet du traitement expérimental (la congruence des énoncés),  $\pi_n$  représente l'effet des sujets ou participants,  $e_{nkl}$  représente l'erreur résiduelle et donc  $y_{nkl}$  correspond à l'observation du sujet  $n$  dans le croisement de  $(k,l)$ . Les détails de l'équation sous la forme matricielle appliqués à l'IRMf ne sont pas présentés ici. Le

lecteur est invité à consulter à ce sujet le chapitre de Penny et Henson (Penny & Henson, 2007).

Ce modèle permet d'étudier l'effet de la présence simultanée d'un facteur A à  $k$  (2) modalités et d'un facteur B à  $l$  (2) modalités sur une variable réponse ou dépendante  $Y$ , le signal *BOLD*. Le plan de l'ANOVA est illustré au tableau 3.3 où chaque cellule représente une combinaison de chacun des niveaux (ou modalités) des deux facteurs : Congruence (A) X Groupe (B).

Tableau 3.3 Plan complet à quatre cellules (2 X 2 modalités)

Congruence (facteur A)	Groupe (facteur B)	
	Difficulté (B <sub>1</sub> )	Facilité (B <sub>2</sub> )
Congruent (A <sub>1</sub> )	A <sub>1</sub> B <sub>1</sub>	A <sub>2</sub> B <sub>1</sub>
Incongruent (A <sub>2</sub> )	A <sub>1</sub> B <sub>2</sub>	A <sub>2</sub> B <sub>2</sub>

Une fois le plan d'analyse élaboré, les cartes statistiques correspondant à chacune des cellules ont été fournies.

- Dans la cellule « A<sub>1</sub>B<sub>1</sub> » se trouvent 12 cartes statistiques de l'activité cérébrale des participants du GrD pour les énoncés congruents.
- Dans la cellule « A<sub>1</sub>B<sub>2</sub> » se trouvent 12 cartes statistiques de l'activité cérébrale des participants du GrD pour les énoncés incongruents.
- Dans la cellule « A<sub>2</sub>B<sub>1</sub> » se trouvent 12 cartes statistiques de l'activité cérébrale des participants du GrF pour les énoncés congruents.
- Dans la cellule « A<sub>2</sub>B<sub>2</sub> » se trouvent 12 cartes statistiques de l'activité cérébrale des participants du GrF pour les énoncés incongruents.

La moyenne marginale de chacun des facteurs et de leur croisement a ensuite été calculée (voir Tableau 3.4). Les moyennes marginales<sup>9</sup> correspondent aux moyennes de chacun des facteurs en fonction de covariables et à la moyenne des croisements des modalités qui « traduit » l'interaction entre les deux facteurs. Les moyennes par colonne et par lignes correspondent aux effets principaux des facteurs (congruence et groupe).

Tableau 3.4 Moyennes marginales dans un design à 2X2 modalités

Congruence (facteur A)	Groupe (facteur B)		
	Difficulté (B <sub>1</sub> )	Facilité (B <sub>2</sub> )	Moyenne
			moy. marg.
Congruent (A <sub>1</sub> )	A <sub>1</sub> B <sub>1</sub>	A <sub>2</sub> B <sub>1</sub>	A   B <sub>1</sub>
			moy. marg.
Incongruent (A <sub>2</sub> )	A <sub>1</sub> B <sub>2</sub>	A <sub>2</sub> B <sub>2</sub>	A   B <sub>2</sub>
	moy. marg.	moy. marg.	moy. marg.
Moyenne	B   A <sub>1</sub>	B   A <sub>2</sub>	A X B

L'analyse factorielle a ensuite été réalisée à partir des moyennes marginales de chacun des deux facteurs et de la moyenne marginale de leur croisement afin de calculer les effets principaux ainsi que l'effet d'interaction entre les variables indépendantes. Pour évaluer la significativité des effets, la procédure utilise sur la statistique F de Fisher qui représente un rapport entre la variance inter-groupes et la variance intra-groupe, en d'autres mots, un rapport entre la variance expliquée et la variance inexpliquée. La statistique F est significative si la variance inter-groupes est considérablement plus

<sup>9</sup> La moyenne marginale dans un plan factoriel correspondent aux moyennes de chaque ligne et de chaque colonne du plan complet (voir Tableau 3.4) ainsi que de la moyenne du croisement des modalités.

grande que la variance intra-groupe. L'ANOVA à plan factoriel a donc permis de mesurer deux effets principaux (groupe et congruence) ainsi que l'effet d'interaction entre des facteurs à l'aide d'un seul modèle statistique basé sur la part de la variance totale expliquée.

Le logiciel *SPM8* (Functional Imaging Laboratory, 2017) offre deux options pour réaliser l'ANOVA : *full factorial* ou *flexible factorial* (Ashburner et al., 2013). Le design *full factorial* est utilisé lorsque tous les facteurs sont inter-sujets, c'est-à-dire lorsque le traitement expérimental est différent entre deux groupes, par exemple pour comparer l'effet de deux interventions pédagogiques. Comme dans cette recherche le facteur « congruence » est intra-sujets, c'est-à-dire chacun des niveaux du traitement expérimental (la congruence des énoncés) est mesuré chez tous les participants, c'est plutôt le design *flexible factorial* qui a été utilisé. Le design *flexible factorial* inclut également un facteur « sujet » qui modélise la variance des participants. Un des principaux avantages de ce design est donc de permettre un meilleur contrôle des différences individuelles entre les sujets, ce qui augmente le degré de liberté de l'analyse.

Dans un design *flexible factorial*, l'effet de traitement de la condition congruente sur le participant donné  $k$  est comparé avec la réponse du même participant pour la condition incongruente. Chaque participant devient ainsi sa propre mesure contrôle à travers les différentes conditions. Ceci permet d'éliminer la variabilité due aux différences individuelles de l'erreur expérimentale. Au final, la procédure a permis de calculer l'effet d'interaction, c'est-à-dire la modification de l'effet principal d'un facteur (groupe ou congruence) du fait de la variabilité de l'autre facteur.

## Test-t

Alors que l'ANOVA à plan factoriel permet d'identifier une différence quelconque dans l'effet principal de chacun des facteurs et dans l'effet jumelé du groupe et de la congruence, le test-t mesure un effet spécifique entre deux conditions. En effet, l'ANOVA ne permet pas d'identifier le sens de l'effet observé dans les régions cérébrales identifiées. Des test-t sont nécessaires pour déterminer le sens des différences d'activation entre les deux groupes. Contrairement à l'ANOVA à plan factoriel qui repose sur la comparaison de la part de la variance expliquée, le test-t permet de tester statistiquement l'hypothèse d'égalité entre les moyennes du signal *BOLD* mesuré.

Pour déterminer si des différences étaient significatives entre les conditions au sein de chacun des groupes, des tests-t de *Student* ont été utilisés selon l'équation 4, mais en remplaçant  $\beta$  par  $\beta_a - \beta_b$ . Lorsque des régions cérébrales sont significativement activées,  $\beta$  est significativement plus grand que zéro.

$$t = \text{moyenne}(\beta) / \text{écart-type}(\text{moyenne}(\beta)) \quad (4)$$

Le sens des résultats de l'ANOVA a donc été précisé à partir des tests-t suivants :

1. **GrF: incongruent > congruent** : Comparaison de l'activité cérébrale observée lors des énoncés incongruents par rapport aux énoncés congruents dans le groupe ayant de la facilité.
2. **GrF: congruent > incongruent** : Comparaison de l'activité cérébrale observée lors des énoncés congruents par rapport aux énoncés incongruents dans le groupe ayant de la facilité.

3. **GrD: incongruent > congruent** : Comparaison de l'activité cérébrale observée lors des énoncés incongruents par rapport aux énoncés incongruents dans le groupe ayant des difficultés.
4. **GrD: congruent > incongruent** : Comparaison de l'activité cérébrale observée lors des énoncés congruents par rapport aux énoncés incongruents dans le groupe ayant des difficultés.

### 3.5.2.3 Seuils de significativité

La détermination du seuil de significativité statistique peut poser problème en IRMf en raison du nombre considérable de voxels impliqués dans les analyses qui peut atteindre plus de 100 000. En fixant le seuil statistique à  $\alpha = 0,05$ , le risque d'accepter l'hypothèse alternative alors qu'elle est fautive est élevé puisqu'un nombre considérable de voxels (5 % de 100 000 équivaut à 5 000) pourront se révéler être significativement activés sans réellement l'être. Le logiciel *SPM* prend en compte cette limite en proposant un seuil *FWE* (*Familywise error rate*) reposant sur la théorie des champs aléatoires (*random field theory*) (Adler & Taylor, 2007; Nichols & Hayasaka, 2003). La correction de type *False discovery rate* (*FDR*) (Genovese, Lazar, & Nichols, 2002) est également utilisée, car plus libérale que la correction *FWE* (Huettel *et al.*, 2008; Poldrack *et al.*, 2011). Lorsque l'une de ces méthodes de correction est utilisée, on parle alors de seuils corrigés (*corrected threshold*) pour les comparaisons multiples, comparativement à des seuils qui ne seraient pas corrigés (*uncorrected threshold*).

Or, dans le cas d'études dont la puissance statistique est peu élevée ou dont la taille de l'échantillon est limitée, cette correction est trop stricte et augmente considérablement les risques de commettre une erreur de type II, c'est-à-dire de rejeter l'hypothèse alternative alors qu'elle est vraie. En d'autres mots, le niveau d'activation de certains voxels ne passerait pas le seuil statistique alors qu'il le devrait.

Pour ces études, en plus des méthodes de correction à seuils corrigés (*corrected threshold*) pour les comparaisons multiples, des méthodes à des seuils non-corrigés (*uncorrected threshold*) sont également utilisées. Une approche intermédiaire non-corrigée répandue consiste à fixer le seuil statistique à  $\alpha_{\text{non-corrigé}} = 0,001$  (Pauli et al., 2016), entre le seuil classique  $\alpha = 0,05$  et le seuil corrigé  $\alpha_{\text{Bon}} = 0,000\ 000\ 5$ . À moins d'indications, les résultats de cette recherche sont présentés d'abord à un seuil non corrigé  $\alpha_{\text{non-corrigé}} = 0,0005$  qui est plus strict que le seuil non-corrigé parmi les plus utilisés ( $\alpha_{\text{non-corrigé}} = 0,001$ ) (Pauli et al., 2016).

#### 3.5.2.4 Masques explicites

Le logiciel *SPM* génère par défaut un masque du cerveau qui contient tous les voxels en commun entre toutes les cartes statistiques individuelles générées lors des analyses à effets aléatoires. Ce masque est un volume utilisé pour circonscrire l'analyse à une section particulière du cerveau. Comme cette étude repose sur des hypothèses de recherche (voir section 2.4) par rapport aux activations cérébrales à observer, il est possible de réaliser en premier lieu une analyse par région d'intérêt (*Region of interest* – *ROI*). Dans une analyse *ROI*, des masques (ou volumes) plus restreints sont utilisés pour comparer directement l'activité cérébrale. L'analyse *ROI* permet aussi de pallier au problème lié aux comparaisons multiples puisqu'elle permet d'augmenter le pouvoir statistique des analyses en optimisant le masque explicite (*explicit mask*) utilisé. Cette approche restreint les analyses statistiques aux voxels associés à ces régions précises du cerveau plutôt que dans le volume entier, ce qui diminue le nombre de tests statistiques réalisés.

Comme les analyses du logiciel *SPM* se déroulent dans l'espace standard *MNI*, les régions d'intérêt sont également définies dans cet espace à partir du *WFU\_PickAtlas* (Maldjian, Laurienti, Kraft, & Burdette, 2003). Les régions d'intérêts correspondent aux trois régions cérébrales identifiées dans l'hypothèse de recherche, soit le cortex

préfrontal ventrolatéral, le cortex préfrontal dorsolatéral et le cortex cingulaire antérieur (voir Annexe J). Comme aucune hypothèse n'a été avancée quant à la latéralisation de l'activité cérébrale, trois masques sont utilisés: bilatéral, gauche et droit. Les résultats des analyses par régions d'intérêt peuvent être présentés à un seuil statistique plus strict que les analyses pour le cerveau entier en raison du nombre restreint de voxels comparés. Les résultats sont donc présentés à un seuil corrigé (*corrected threshold*) pour les comparaisons multiples  $\alpha_{\text{FWE-corrigé}} < 0,05$  au niveau du pic d'activation.

### **Résumé du plan d'analyse des données cérébrales**

La première étape a consisté à calculer la moyenne des résultats pour chacun des participants à partir d'une analyse de premier niveau à effets fixes qui combine les images fonctionnelles obtenues dans les quatre séries de la tâche cognitive. Cette étape a produit une carte statistique pour chacun des participants et pour chacune des conditions, c'est-à-dire les énoncés incongruents et les énoncés congruents. Ensuite, pour comparer l'activité cérébrale entre les deux groupes, une analyse à effets aléatoires a été réalisée. Cette analyse consistait à combiner les résultats de l'ensemble des participants de chacun des groupes. Les analyses à effets aléatoires permettent quant à elles de généraliser puisque pour qu'une différence significative soit observée, l'effet moyen doit être observé chez l'ensemble des participants de l'échantillon. Par conséquent, des participants dont l'activité cérébrale aurait été extrêmement sensible aux énoncés de la tâche cognitive ne pouvaient influencer démesurément les données en compensant pour l'activité plus faible d'autres participants. Suite aux analyses à effets aléatoires, une ANOVA à plan factoriel et les tests-t ont été réalisés. L'objectif principal de l'ANOVA à plan factoriel était de tester l'effet d'interaction de deux variables indépendantes catégorielles (facteurs), le groupe et la congruence, sur une variable dépendante, l'activité cérébrale.

### 3.6 Les considérations éthiques

Aucune difficulté éthique particulière n'a été soulevée par cette recherche. Une précaution particulière a été prise afin que ni les participants ni leurs parents ne soient informés du recrutement d'un GrD. Les participants étaient informés que le but de cette recherche était de mieux comprendre les mécanismes cérébraux associés à la compréhension des concepts scientifiques (voir la lettre d'invitation à l'Annexe I).

Tel que recommandé par l'Université du Québec à Montréal, la demande d'approbation éthique de cette recherche a été traitée par le Comité mixte d'éthique de la recherche de l'Unité de neuroimagerie fonctionnelle (UNF) du CRIUGM qui possède une expertise spécifique liée à cette recherche impliquant l'IRMf. Le comité mixte d'éthique et de la recherche de l'UNF est mandaté par le Ministère de la Santé et des Services sociaux du Québec pour évaluer et attribuer les autorisations éthiques des projets de recherche se déroulant dans leurs installations.

#### 3.6.1 L'utilisation de l'IRMf

La collecte des données en IRMf a été rendue possible grâce à l'appui financier du Fonds de recherche du Québec – Société et culture dans le cadre d'une subvention *Établissement de nouveaux professeurs-chercheurs* (2014-NP-172795) octroyée au directeur de recherche (Steve Masson).

L'IRMf est une technologie sécuritaire et éprouvée (Poldrack et al., 2011). Selon les connaissances actuelles, la participation à une étude impliquant l'IRMf ne fait courir, sur le plan médical, aucun risque, à condition de respecter certaines contre-indications (présence d'un stimulateur cardiaque, d'un clip d'anévrisme, etc.) précisées dans le formulaire de dépistage à l'Annexe F. L'identification de ces contre-indications fait

l'objet d'un processus rigoureux supervisé par les autorités responsables de l'UNF. D'abord, les participants ont rempli un formulaire de dépistage fourni par l'UNF pour identifier toutes contre-indications éventuelles. Dès que le participant présentait une contre-indication, il était automatiquement exclu de l'étude. Dans cette recherche, cinq participants ont été exclus en raison de contre-indications : deux en raison du port d'appareils orthodontiques, l'un en raison de risques de claustrophobie, l'un en raison d'un implant métallique à l'œil et enfin un dernier en raison d'un implant métallique à la colonne vertébrale. Lors d'une séance d'IRMf, les responsables de l'UNF vérifiaient à nouveau la présence de contre-indications avec le participant et son responsable légal s'il s'agissait d'un participant mineur.

Les conditions imposées par l'utilisation de l'IRMf peuvent entraîner un certain inconfort du fait de devoir rester immobiles pendant l'examen et à cause du bruit que génère le fonctionnement de l'appareil. Les participants peuvent aussi ressentir un certain stress ou une sensation de claustrophobie. Pour minimiser les inconvénients associés au bruit, des bouchons protecteurs et un casque d'écoute ont été fournis au participant et, pour minimiser l'inconfort lié au fait de devoir rester immobile, des coussins ont été placés sous les jambes et les coudes. Une description détaillée de la façon dont s'est déroulée la collecte des données a été présentée aux participants afin de réduire leur niveau de stress.

Enfin, pour obtenir le consentement des participants, le formulaire de consentement approuvé par le Comité mixte d'éthique de la recherche du Regroupement de neuroimagerie du Québec a été utilisé (voir Annexes E et F). Ce formulaire décrit le projet, son objectif, les inconvénients et les avantages liés à une participation au projet et mentionne explicitement que le participant a le droit de se retirer de l'étude en tout temps. Comme certains participants de cette étude sont des adolescents mineurs, le consentement écrit d'un responsable légal a été exigé en plus du consentement du participant lui-même.

### 3.6.2 L'obtention du consentement éclairé

Les participants ont été recrutés sur une base volontaire. Ils ont été avisés qu'ils auront le droit, à tout moment, de se retirer du projet, et ce, sans fournir aucune justification ni subir aucune pénalité. Les participants ont tous eu à signer un formulaire de consentement qui a été préalablement approuvé par les comités éthiques de l'Université du Québec à Montréal et de l'UNF. Une fois que le participant avait lu le formulaire de consentement, les termes de ce formulaire lui ont été expliqués et l'expérimentateur a répondu à toutes les questions de ce dernier. Une copie signée du formulaire a également été remise au participant.

### 3.6.3 Le respect de la confidentialité et de l'anonymat

Les renseignements qui ont été recueillis dans le cadre de cette recherche sont confidentiels. Les participants ont été identifiés par un numéro de code et la clé du code reliant le nom du participant à son dossier de recherche est conservée par l'expérimentateur dans un lieu sécuritaire. De plus, afin de préserver l'anonymat de chacun, les publications ou communications scientifiques associées au projet ne renferment aucun élément d'information pouvant permettre d'identifier un participant.

## CHAPITRE IV

### RÉSULTATS ET DISCUSSION

Ce quatrième chapitre présente les résultats obtenus et leur interprétation. Dans un premier temps, les résultats comportementaux (temps de réponse et taux de réussite) des participants à la tâche cognitive sont présentés. Ensuite, les résultats cérébraux sont présentés afin de mettre en évidence comment l'activité cérébrale des groupes diffère lorsque les participants répondent à des énoncés congruents ou incongruents.

Les résultats sont interprétés de façon à établir des liens entre les activations cérébrales observées et l'hypothèse de recherche selon laquelle les élèves ayant des difficultés conceptuelles, c'est-à-dire qui obtiennent des performances faibles à des tâches de nature conceptuelle en sciences, activent moins que d'autres élèves ayant plus de facilité le contrôle inhibiteur.

Ensuite, les résultats font l'objet d'une discussion en lien avec l'hypothèse de recherche ainsi qu'avec les travaux en didactique des sciences menés dans une perspective de mobilisation des conceptions scientifiques. Puis, les principales limites de l'étude sont identifiées. Enfin, les retombées éducatives envisagées, et des perspectives de recherche sont présentées.

## 4.1 Les résultats et l'interprétation

Dans les prochaines sections, les résultats comportementaux et cérébraux sont présentés et interprétés.

### 4.1.1 Les résultats comportementaux

En excluant les énoncés des blocs mixtes, les 24 participants ont chacun répondu à 64 énoncés de type congruents et 64 énoncés de type incongruents, ce qui produit au total 3072 observations comportementales. Afin de préparer ces données aux analyses statistiques, les données manquantes ou extrêmes ont d'abord été retirées.

En premier lieu, huit énoncés (0,3 % des données) pour lesquels les participants n'ont pas fourni de réponse ont été écartés des analyses. Puis, trois énoncés (0,1 % des données) pour lesquels le temps de réponse est inférieur à une seconde (1 000 millisecondes) ont aussi été mis de côté. Il est peu probable que ces trois énoncés représentent des données valides puisque plus d'une seconde est nécessaire pour simplement lire et comprendre les énoncés. Il s'agit donc vraisemblablement de « faux départs », c'est-à-dire d'énoncés pour lesquels les participants ont appuyé sur le bouton par erreur.

Dans un deuxième temps, les temps de réponse représentant des données extrêmes ont été identifiés puis écartés. Pour ce faire, les limites inférieure et supérieure des temps de réponse admissibles pour chacun des participants ont été calculées. La limite inférieure a été obtenue en multipliant l'écart interquartile ( $Q3 - Q1$ ) des distributions par un facteur de 2,2 (Hoaglin, Iglewicz, & Tukey, 1986) et en soustrayant la valeur obtenue au quartile 1 ( $Q1$ ). La valeur de la limite supérieure est obtenue en additionnant la même valeur au quartile 3 ( $Q3$ ). Au total, six observations (0,2 % des données) ont

été exclues. En somme, 3055 observations ont été conservées pour produire les statistiques descriptives et les comparaisons de groupe.

#### 4.1.1.1 Les résultats et l'interprétation des taux de réussite

Le tableau 4.1 présente les taux de réussite des participants du GrF et du GrD aux deux conditions des énoncés de la tâche cognitive : congruent et incongruent. Comme mentionné précédemment, le taux de réussite des participants est calculé en excluant les réponses manquantes, les données extrêmes ou les observations pour lesquelles le temps de réponse est inférieur à l'estimation du temps de lecture minimum des énoncés fixé à 1000 ms.

Pour les énoncés incongruents, les élèves du GrD ont obtenu un taux de réussite moyen de 43 %, tandis que les élèves du GrF ont obtenu en moyenne 66 % (différence de 23 %). Cette différence est statistiquement significative ( $U = 0$ ;  $p < 0,0001$  ;  $\eta^2 = 0,76$ ) et la taille de l'effet est grande ( $> 0,14$ ) (Bakeman, 2005). Pour les énoncés congruents, les taux de réussite des deux groupes sont plus comparables. Les élèves ayant des difficultés ont obtenu un taux de réussite moyen de 80 % et les élèves ayant de la facilité ont obtenu en moyenne 91 % (différence de 11 %). Cette différence ( $U = 11,5$ ;  $p < 0,0001$ ;  $\eta^2 = 0,54$ ), bien que statistiquement significative, est moins importante que dans le cas des énoncés incongruents et la taille de l'effet est grande ( $< 0,14$ ).

Au sein de chacun des groupes, le taux de réussite est significativement plus faible pour les énoncés incongruents que pour les énoncés congruents. Dans le GrF ( $Z = -2,51$ ,  $p < 0,05$ ,  $r = -0,72$ ) comme dans le groupe ayant de la difficulté ( $Z = -2,90$ ,  $p < 0,05$ ,  $r = -0,84$ ), les tailles de l'effet sont grandes ( $> 0,5$ ) (Cohen, 1988). Toutefois, la différence est plus importante et la taille de l'effet est plus grande dans le GrD ( $r = -0,84$ ) par rapport au GrF ( $r = -0,72$ ).

Tableau 4.1 Taux de réussite (en %) pour pour l'ensemble des énoncés des deux conditions

Condition	Groupe ayant de la facilité (n = 12)				Groupe ayant des difficultés (n = 12)				Différence
	Min	Max	Moy.	É.-T.	Min	Max	Moy.	É.-T.	
Congruent	75	97	91	6	70	88	80	6	U = 11,5; p < 0,0001 $\eta^2 = 0,54$
Incongruent	59	89	66	6	30	50	43	6	U = 0,0 ; p < 0,0001 $\eta^2 = 0,76$
Différence Wilcoxon	Z = - 2,51 p < 0,05 r = - 0,72				Z = - 2,90 p < 0,05 r = - 0,84				

Tableau 4.2 Temps de réponse en millisecondes (ms) pour l'ensemble des énoncés des deux conditions

Condition	Groupe ayant de la facilité (n = 12)				Groupe ayant des difficultés (n = 12)				Différence
	Min	Max	Moy.	É.-T.	Min	Max	Moy.	É.-T.	
Congruent	2461	4524	3298	594	2861	5085	4120	720	U = 26,000; p < 0,01 $\eta^2 = 0,31$
Incongruent	2813	5021	3707	648	2873	5468	4321	810	U = 37,000; p < 0,05 $\eta^2 = 0,18$
Différence Wilcoxon	Z = - 2,98 p < 0,05 r = - 0,86				Z = - 2,67 p < 0,05 r = - 0,77				

En somme, les participants du GrF se distinguent des participants du GrD quant au taux de réussite obtenu pour les deux types d'énoncés. Les résultats montrent qu'il existe une différence significative entre les deux groupes aux énoncés incongruents et que les participants du GrD ont obtenu un taux de réussite beaucoup plus faible puisque la taille de l'effet est grande ( $\eta^2 = 0,76$ ). Les participants du GrD ont aussi obtenu un taux de réussite plus faible pour les énoncés de la condition contrôle (congruents), toutefois, la taille de l'effet est moins importante ( $\eta^2 = 0,54$ ). Ces résultats confirment donc que **la principale différence entre les deux groupes est le taux de réussite aux énoncés incongruents**, et donc, par hypothèse, la capacité à mobiliser les conceptions scientifiques<sup>10</sup>.

#### 4.1.1.2 Les résultats et interprétation des temps de réponse

Le tableau 4.2 présente les temps de réponse des participants du GrF et du GrD. Le temps de réponse est le temps écoulé entre le début de la présentation d'un énoncé et le moment où le participant appuie sur le bouton pour donner sa réponse. Plus le temps de réponse est court, plus les participants répondent rapidement. En général, les élèves ayant de la facilité ont répondu plus rapidement que les élèves ayant des difficultés, et ce, pour les deux types d'énoncés.

Pour les énoncés congruents, le temps de réponse moyen des élèves ayant de la facilité est de 3298 millisecondes alors qu'il est de 4120 millisecondes pour les élèves ayant des difficultés. Cette différence est statistiquement significative ( $U = 26$ ;  $p < 0,01$ ;  $\eta^2 = 0,31$ ) et la taille de l'effet est grande ( $> 0,14$ ) (Bakeman, 2005). Pour les énoncés

---

<sup>10</sup> Les résultats obtenus à partir de tests paramétriques (ANOVA) vont dans le même sens et révèlent un effet d'interaction significatif entre le facteur congruence et le facteur groupe. Cela signifie que l'effet de la condition (congruente ou incongruente) sur le taux de réussite varie en fonction du groupe (élèves ayant des difficultés et élèves ayant de la facilité).

incongruents, le temps de réponse moyen des élèves ayant de la facilité est de 3707 millisecondes et il est de 4321 millisecondes pour les élèves ayant des difficultés. Cette différence est statistiquement significative ( $U = 37$ ;  $p < 0,05$ ;  $\eta^2 = 0,18$ ) et la taille de l'effet est aussi grande ( $> 0,14$ ). Les temps de réponse du GrF et du GrD présentent donc des écarts à la fois pour les énoncés congruents et incongruents. Cette différence semble être induite par le fait que le GrF a, de manière générale, répondu rapidement, et en particulier aux énoncés congruents.

Au sein de chacun des groupes, le temps de réponse est significativement plus long pour les énoncés incongruents que pour les énoncés congruents. Dans le GrF ( $Z = -2,98$ ,  $p < 0,05$ ,  $r = -0,86$ ) comme dans le GrD ( $Z = -2,67$ ,  $p < 0,05$ ,  $r = -0,77$ ), les tailles de l'effet sont grandes ( $> 0,5$ ) (Cohen, 1988). Toutefois, **la différence est deux fois plus importante dans le GrF (409 ms) par rapport au GrD (201 ms)<sup>11</sup>**. Cette différence est encore plus grande en considérant l'écart relatif dans le GrF (12 % d'augmentation) par rapport au GrD (5% d'augmentation). Ce résultat suggère que pour réussir à obtenir un taux de réussite plus élevé aux énoncés incongruents, les élèves du GrF ont eu recours à une étape de traitement de l'information supplémentaire ou à un raisonnement plus complexe.

Le tableau 4.3 présente les temps de réponse cette fois exclusivement pour les énoncés réussis, c'est-à-dire où la réponse est scientifiquement appropriée, et ce, pour l'ensemble des participants. Les résultats montrent qu'il faut effectivement plus de

---

<sup>11</sup> Les résultats obtenus à partir de tests paramétriques (ANOVA) vont dans le même sens et révèlent une tendance près du seuil de significativité ( $p = 0,057$ ) vers un effet d'interaction entre le facteur congruence et le facteur groupe. L'effet de la condition (congruente ou incongruente) sur le temps de réponse semble donc avoir tendance à varier en fonction du groupe (élèves ayant des difficultés et élèves ayant de la facilité).

temps (328 ms) pour réussir les énoncés incongruents que pour réussir les énoncés congruents ( $Z = - 3,729$ ;  $p < 0,0005$ ;  $r = - 0,8$ ) et la taille de l'effet est grande ( $> 0,5$ ) (Cohen, 1988). Toutefois, ces temps de réponse sont à considérer avec prudence puisque comme seuls les énoncés réussis sont retenus, les conditions congruente et incongruente risquent d'être moins équivalentes. Il est donc possible que la différence entre temps de réponse des deux conditions soit attribuable à des variables confondantes comme le nombre de mots, le temps de lecture ou les concepts abordés. Néanmoins, la différence va dans le même sens que les résultats obtenus à partir de l'analyse de l'ensemble des énoncés, ces résultats semblent donc indiquer un effet significatif de la congruence sur les temps de réponse.

Tableau 4.3 Temps de réponse en millisecondes (ms) pour tous les énoncés réussis des deux conditions

Condition	Min	Max	Moyenne	É.-T.
Congruent	2462	5006	3618	725
Incongruent	2721	5790	3946	901
Différence Wilcoxon	$Z = - 3,729$	$p < 0,0005$	$r = - 0,8$	

Dans l'ensemble, les participants du GrF se distinguent des participants du GrD quant au temps de réponse nécessaire pour répondre aux énoncés des deux conditions. De manière générale, les participants du GrF ont répondu plus rapidement que les participants du GrD, même dans le cas des énoncés incongruents pour lesquels, selon l'hypothèse de recherche, les élèves ayant de la facilité devraient activer davantage le contrôle inhibiteur. Or, en comparant le temps de réponse pour une condition par

rapport à l'autre, les résultats montrent que **le temps de réponse des élèves ayant de la facilité s'accroît davantage lorsqu'ils évaluent des énoncés incongruents par rapport à des énoncés congruents (409 ms)**. Le temps de réponse des élèves du GrD n'augmente que de la moitié de ce délai (201 ms). Ces résultats confirment donc que **la différence la plus importante entre les deux groupes est le temps de réponse supplémentaire requis pour répondre aux énoncés incongruents par rapport aux énoncés congruents**. Comme mentionné à la section 2.3.2, plusieurs recherches associent l'accroissement du temps de réponse à l'activation du contrôle inhibiteur (De Neys, 2006; Evans & Curtis-Holmes, 2005; Kelemen & Rosset, 2009; Kelemen et al., 2012; Shtulman & Valcarcel, 2012). Inhiber constituerait une étape de traitement supplémentaire avant de fournir une réponse.

Tout compte fait, sur le plan comportemental, les élèves ayant de la facilité démontrent donc un taux de réussite plus élevé que les élèves ayant des difficultés, principalement pour les énoncés incongruents. De plus, **les élèves ayant de la facilité ralentissent davantage leurs temps de réponses aux énoncés incongruents par rapport aux énoncés congruents. Ce délai peut être interprété comme un indice de l'activation plus importante du contrôle inhibiteur**.

#### 4.1.2 Les résultats cérébraux

Les prochaines sous-sections présentent les résultats de l'ANOVA à plan factoriel et des tests-t. L'objectif principal des analyses statistiques est de comparer comment l'activité cérébrale des deux groupes diffère lorsqu'ils répondent à des énoncés congruents ou incongruents.

#### 4.1.2.1 L'effet d'interaction

Dans cette section les résultats cérébraux de l'ANOVA à plan factoriel sont présentés d'abord par régions d'intérêt et par la suite pour le volume cérébral entier.

#### L'analyse par région d'intérêt

L'analyse de l'effet d'interaction a d'abord été effectuée par des analyses par régions d'intérêt « *Region of interest – ROI* ». Les masques appliqués ont restreint les analyses aux voxels associés aux trois régions cérébrales de l'hypothèse de recherche, soit le CPVL, le CPDL et le CCA. Les régions d'intérêt sont définies à partir du WFU\_PickAtlas (Maldjian et al., 2003). Le tableau 4.4 présente les résultats de l'effet d'interaction du groupe et de la condition par analyse par région d'intérêt en utilisant les masques bilatéraux (CPVL, CPVL, CCA).

Tableau 4.4 Effet d'interaction du groupe et de la condition par analyse par régions d'intérêt avec masques bilatéraux du cortex préfrontal ventrolatéral, du cortex préfrontal dorsolatéral et du cortex cingulaire antérieur

Régions cérébrales	Aire de Brodmann (BA)	Coordonnées MNI			F	k	
		x	y	z			
		Cortex préfrontal ventrolatéral	BA 45/47	n.s.			
Cortex préfrontal dorsolatéral	BA 46/10	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	p = 0,08	
Cortex cingulaire antérieur	BA 24/32	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	aucun voxel

Note : analyse à effets aléatoires et masques définis à partir du WFU Pickatlas (voir Annexe J).

Les résultats sont présentés à un seuil corrigé (*corrected threshold*) pour les comparaisons multiples  $\alpha_{FWE\text{-corrigé}} < 0,05$  au niveau du pic d'activation et précisent l'aire de Brodmann correspondante.

Une seconde analyse a été réalisée avec les masques des trois régions associées au contrôle inhibiteur, mais cette fois avec un masque latéralisé à gauche. Le tableau 4.5 présente les résultats de l'effet d'interaction du groupe et de la condition par analyse par région d'intérêt de en utilisant les masques latéralisés à gauche du CPVL, CPDL et CCA.

Tableau 4.5 Effet d'interaction du groupe et de la condition par analyse par régions d'intérêt avec masques latéralisés à gauche du cortex préfrontal ventrolatéral, du cortex préfrontal dorsolatéral et du cortex cingulaire antérieur

Régions cérébrales	Aire de Brodmann (BA)	Coordonnées MNI			F	k	
		x	y	z			
Cortex préfrontal ventrolatéral	BA 47	-36	39	-6	18,48	2	p = 0,05
Cortex préfrontal dorsolatéral	BA 46/10	-33	39	-9	17,88	5	p = 0,04
Cortex cingulaire antérieur	BA 24/32	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	aucun voxel

Note : analyse à effets aléatoires,  $p_{(FWE\text{-peak level})} \leq 0,05$ , coordonnées dans l'espace MNI de SPM8. Les masques sont définis à partir du WFU Pickatlas (voir Annexe J).

Une troisième analyse a été réalisée avec les masques des trois régions associées au contrôle inhibiteur, mais cette fois avec un masque latéralisé à droite. Le tableau 4.6

présente les résultats de l'analyse par région d'intérêt de l'effet d'interaction du groupe et de la condition en utilisant les masques latéralisés à droite.

Tableau 4.6 Effet d'interaction du groupe et de la condition par analyse par régions d'intérêt avec masques latéralisés à droite du cortex préfrontal ventrolatéral, du cortex préfrontal dorsolatéral et du cortex cingulaire antérieur

Régions cérébrales	Aire de Brodmann (BA)	Coordonnées MNI			F	k	
		x	y	z			
		Cortex préfrontal ventrolatéral	BA 47	n.s.			
Cortex préfrontal dorsolatéral	BA 46/10	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	aucun voxel
Cortex cingulaire antérieur	BA 24/32	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	aucun voxel

Note : analyse à effets aléatoires et masques définis à partir du WFU Pickatlas (voir Annexe J).

En somme, les résultats de l'analyse par régions d'intérêt montrent que l'effet d'interaction est significatif à un seuil corrigé *FWE* de 0,05 dans le CPDL gauche et une tendance est observée dans le CPVL gauche ( $p = 0,05$ ). Toutefois, aucun résultat significatif ou tendance n'est obtenu en utilisant un masque bilatéral ou droit. De plus, aucune activation du CCA n'est observée.

### L'analyse du volume cérébral entier

Les résultats de la section qui suit ont été réalisés à partir du volume cérébral entier, une analyse appelée « *whole brain analysis* », à un seuil statistique non-corrigé de  $p < 0,0005$  et pour les activations d'un minimum de 20 voxels. Le tableau précise les coordonnées *MNI* (*Montreal Neurological Institute*) de ces régions, l'aire de Brodmann correspondante, la valeur de F (statistique de Fisher) et la valeur de k (nombre de voxels) qui correspond à la taille des régions.

L'effet d'interaction du groupe et de la congruence est significatif pour une activation cérébrale qui chevauche le cortex préfrontal ventrolatéral gauche (CPVL) et le cortex préfrontal dorsolatéral gauche (CPDL). Les résultats sont détaillés au tableau 4.7 et sont illustrés à la figure 4.1.

Tableau 4.7 Régions cérébrales significativement associées à l'interaction du groupe (facilité/difficulté) et de la condition (congruent/incongruent)

Régions cérébrales	Aire de Brodmann (BA)	Coordonnées MNI			F	k
		x	y	z		
Cortex préfrontal ventrolatéral gauche/Cortex préfrontal dorsolatéral gauche	BA 47/10	-30	42	-3	21,99	26

Note : analyse à effets aléatoires,  $p_{(unc.)} < 0,0005$ , min. 20 voxels, coordonnées dans l'espace *MNI* de *SPM8*. L'identification des régions est réalisée à partir de l'atlas Talairach (Talairach & Tournoux, 1988a).

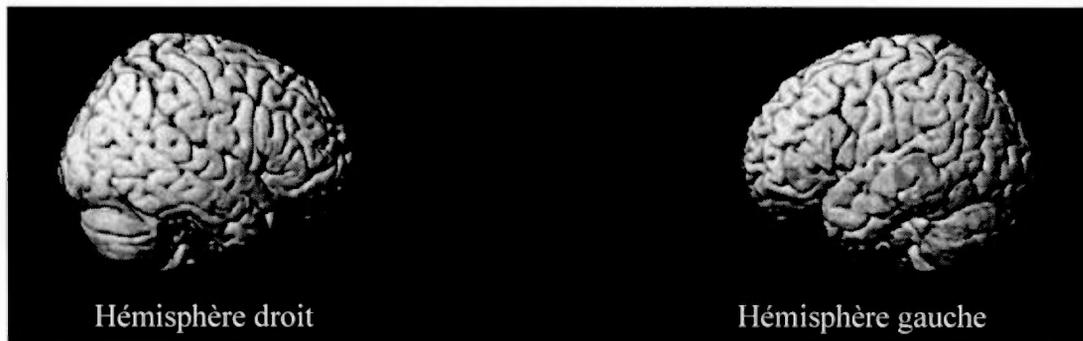


Figure 4.1 Région cérébrale significativement plus activée par l'interaction du groupe (facilité/difficulté) et de la condition (congruent/incongruent)

#### 4.1.2.2 Le sens de l'effet d'interaction

Afin de vérifier le sens des effets observés à la section précédente, des tests-t sont réalisés et un outil de visualisation est utilisé. Tous les résultats sont présentés au seuil ( $p < 0,0005$  [non-corrigé]) et pour un minimum de 20 voxels. L'aire de Brodmann correspondante, la valeur de F (statistique de Fisher) et la valeur de k (nombre de voxels) qui correspond à la taille des régions sont aussi présentées.

#### Les tests-t

Le tableau 4.8 et la figure 4.2 présentent les résultats des contrastes entre les deux conditions pour les deux groupes. Les résultats montrent que chez les participants du GrF, l'activité cérébrale dans le CPDL gauche (BA 46/10) est plus importante lors des énoncés incongruents par rapport aux énoncés congruents. L'activité cérébrale dans le précunéus bilatéral (BA 18), l'aire visuelle primaire gauche (BA 17) et le cortex cingulaire postérieur bilatéral (BA 23) est plus importante lors des énoncés congruents par rapport à incongruents. Chez les participants du GrD, aucune région cérébrale n'est significativement plus activée dans une condition par rapport à l'autre. Les résultats des tests-t démontrent donc que l'effet d'interaction significatif à la frontière du CPVL et du CPDL gauches (BA 47/10) semble vraisemblablement induit par la différence de

l'activité cérébrale entre les énoncés congruents et incongruents dans le groupe d'élèves ayant de la facilité.

Tableau 4.8 Régions cérébrales significativement plus activées chez les élèves ayant de la facilité et ayant des difficultés pour les énoncés congruents et incongruents

Régions cérébrales	Aire de Brodmann	Coordonnées MNI			t	k
		x	y	z		
Groupe facilité Incon > Congr						
Cortex préfrontal dorsolatéral gauche	BA 46/10	-39	48	3	6,15	22
Groupe facilité Congr > Incon						
Précunéus bilatéral	BA 18	-3	-72	27	7,08	129
Aire visuelle primaire gauche	BA 17	-24	66	9	6,11	24
Cortex cingulaire postérieur bilatéral	BA 23	-3	-33	24	5,67	42
Groupe difficultés Incon > Congr						
		n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
Groupe difficultés Congr > Incon						
		n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.

Note : analyse à effets aléatoires,  $p_{(unc.)} < 0,0005$ , min. 20 voxels, coordonnées dans l'espace MNI de SPM8. L'identification des régions est réalisée à partir de l'atlas Talairach (Talairach & Tournoux, 1988b).

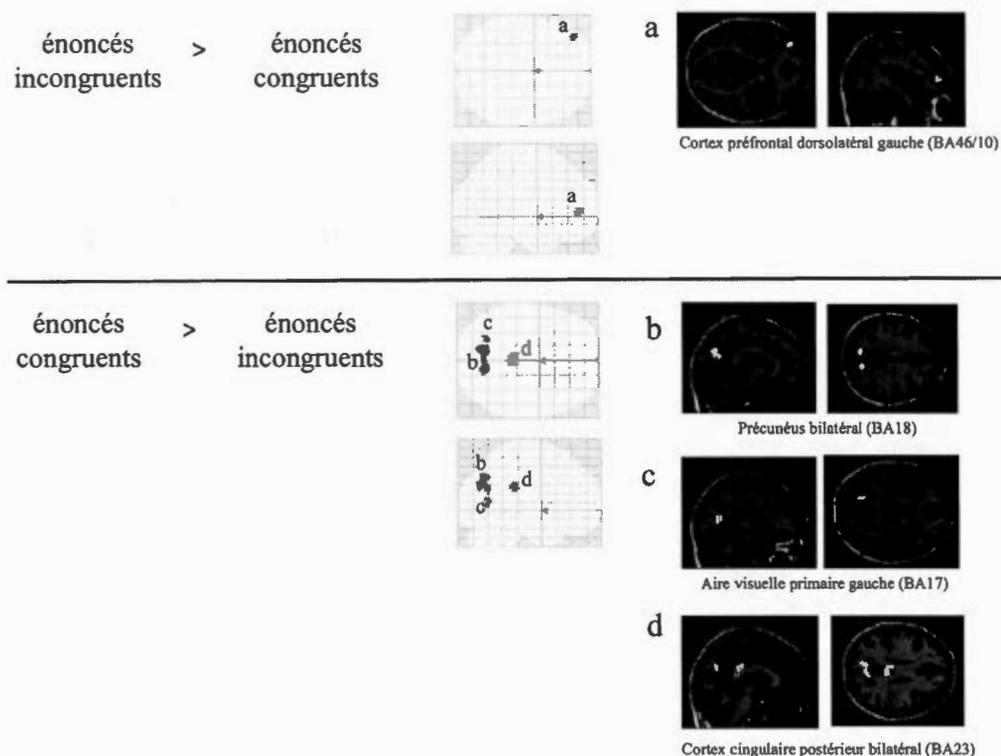


Figure 4.2 Régions cérébrales significativement plus activées chez les élèves ayant de la facilité pour une condition par rapport à l'autre.

### Outil de visualisation

Le sens de l'effet d'interaction peut également être visualisé à partir de l'outil *FIVE* (*Functional Image Visualization Environment*) (Schultz, 2011). Les résultats sont présentés sous forme graphique à la figure 4.3. Les points indiquent le pourcentage de variation du signal *BOLD* dans la région identifiée par l'analyse à plan factoriel du cerveau entier (activation chevauchant le CPVL et CPDL gauches). Le non-parallélisme des lignes traduit le fait que l'effet de la congruence n'est pas le même en fonction du groupe. Les effets des deux facteurs sur l'activité cérébrale ne sont donc pas additifs, ils semblent plutôt interagir. Pour les énoncés congruents (tracé bleu), l'activité cérébrale apparaît plutôt constante entre les deux groupes. Toutefois, pour les

énoncés incongruents (tracé rouge), l'activité cérébrale est supérieure pour le GrF par rapport au GrD.

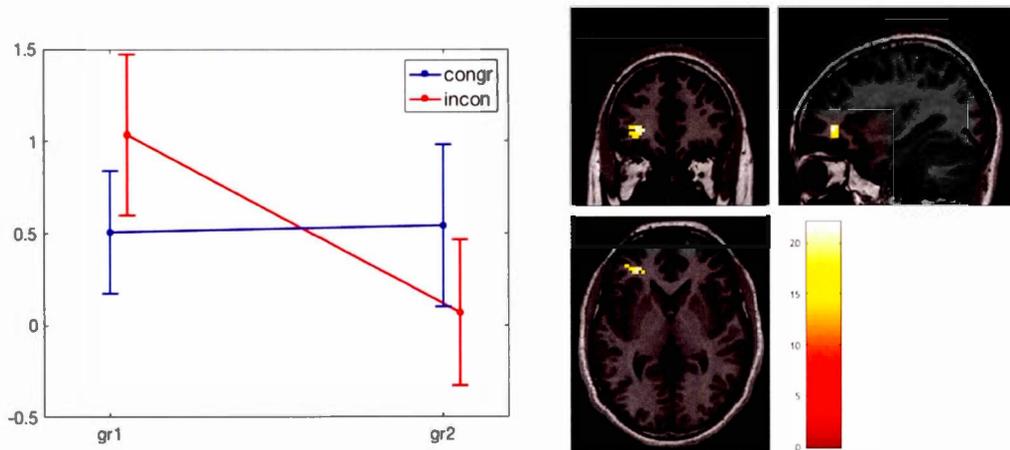


Figure 4.3 Visualisation de l'effet d'interaction de l'activité cérébrale moyenne dans la région cérébrale identifiée par l'ANOVA (CPVL/CPDL gauche).

Notes : gr1 : GrF; gr2 : GrD; congr : énoncés congruents; incon : énoncés incongruents.

#### 4.1.2.3 L'interprétation des résultats cérébraux

Les résultats montrent un effet d'interaction significatif pour une activation cérébrale chevauchant le cortex préfrontal dorsolatéral gauche (CPDL) et le cortex préfrontal ventrolatéral gauche (CPVL) et le sens de cet effet est révélé par les résultats provenant des contrastes (tests-t) subséquents. Les élèves ayant plus de facilité présentent des activations cérébrales plus prononcées à la frontière du CPVL et CPDL gauches lorsqu'ils évaluent des énoncés incongruents. Le contraste inverse (énoncés congruents > incongruents) montre qu'ils activent davantage le précunéus bilatéral, les aires visuelles primaires ainsi que le cortex cingulaire postérieur. Le précunéus joue un rôle important dans la réorientation des ressources liées à l'attention et son activation est souvent associée à un état de repos ou de veille (Fransson & Marrelec, 2008; Fugelsang & Dunbar, 2005; Mazoyer, Wicker, & Fonlupt, 2002). Les résultats

suggèrent donc que les élèves ayant de la facilité ont réorienté une partie de leur attention ailleurs qu'à la tâche cognitive lors de l'évaluation des énoncés congruents. Le cortex cingulaire postérieur (CCP) est également associé à la réorientation de l'attention et serait fortement connecté au précunéus (Fransson & Marrelec, 2008). Comme le précunéus, il jouerait un rôle dans le contrôle actif du mode veille du cerveau (*default mode network*) qui serait nécessaire à l'utilisation efficace des fonctions cognitives (Leech & Sharp, 2014). Ce mode en veille serait apparenté à un état relatif de « repos » et se désactiverait rapidement lorsque l'attention doit être dirigée vers un stimulus externe (Buckner, Andrews-Hanna, & Schacter, 2008). L'activation plus importante du précunéus et du CPP suggère donc que les énoncés congruents étaient traités de manière plus automatique ou du moins que leur évaluation reposait sur des processus qui impliquaient peu d'attention tandis que l'évaluation des énoncés incongruents requérait de désactiver le mode en veille et porter davantage attention à la tâche. Enfin, l'activation plus importante des aires visuelles suggère que lors de l'évaluation des énoncés congruents, l'information a été traitée d'une manière plus sensorielle.

Les résultats montrent que les élèves ayant des difficultés ne présentent quant à eux aucune différence d'activité cérébrale significative lorsqu'ils évaluent des énoncés incongruents par rapport à des énoncés congruents. Aucune région cérébrale n'est non plus significativement plus activée pour le contraste inverse, c'est-à-dire lorsqu'ils évaluent des énoncés congruents par rapport à des énoncés incongruents. **Cette absence de différence suggère que les élèves ayant des difficultés réalisent un travail cérébral similaire lorsqu'ils évaluent les énoncés congruents et incongruents.** Ce résultat pourrait contribuer à expliquer que les élèves du GrD aient obtenu des scores beaucoup plus faibles aux énoncés incongruents.

Dans l'ensemble, alors que l'activité cérébrale est similaire entre les deux groupes lors de l'évaluation d'énoncés congruents, les élèves ayant de la facilité activent davantage

que les élèves ayant de la difficulté le CPDL et du CPVL gauches lors de l'évaluation d'énoncés incongruents. **Les résultats semblent donc indiquer que les élèves du GrD sous-activent le CPDL et le CPVL gauches par rapport aux élèves du GrF lorsqu'ils répondent à des énoncés de type incongruent.** L'activation plus importante du CPDL et du CPVL chez les élèves ayant de la facilité n'est pas surprenante selon l'hypothèse de la coexistence des conceptions spontanées et scientifiques. Comme il a été mentionné à la section 2.3.1, le contrôle inhibiteur est associé à un réseau cérébral fonctionnel dont le CPDL, une région plus activée lors de la manipulation et sélection de l'information en mémoire de travail, et le CPVL, une région plus activée lors du blocage ou de la suppression d'une réponse (Leung et al., 2000; Lie et al., 2006; Monchi et al., 2001; Nyhus & Barceló, 2009). Selon le modèle du *conflict monitoring* de Botvinick (2007), en situation de conflit, c'est-à-dire lorsque plusieurs réponses possibles entrent en compétition, le cortex préfrontal (CPVL et CPDL) serait davantage activé afin d'exercer un meilleur contrôle sur les actions et réflexes. L'instauration de ce contrôle serait initiée par le CCA qui est responsable de détecter le conflit afin de signaler la nécessité d'allouer davantage de ressources cognitives. Les résultats confirment donc en partie l'hypothèse de recherche qui prédisait que les élèves ayant des difficultés conceptuelles démontrent une sous-activation du CPVL, CPDL et du CCA par rapport aux élèves ayant plus de facilité.

Comme il a été mentionné au deuxième chapitre (voir section 2.2.3), des études portant sur le lien entre la mobilisation des conceptions scientifiques et le contrôle inhibiteur ont obtenu des résultats allant dans le même sens que ceux de cette recherche, c'est-à-dire une activation plus importante du CPVL et du CPDL. Nelson et al. (2007) ont observé davantage d'activité dans le CPVL et CPDL gauches lorsque des experts en chimie évaluent l'exactitude de stimulus incongruents représentant le changement de phase liquide à gazeux. Bien que les auteurs aient interprété cette activation comme un indice d'un traitement de l'information de nature sémantique et conceptuelle ainsi qu'à la sollicitation de la mémoire de travail, plusieurs recherches présentées plus haut

associent le CPVL gauche au contrôle inhibiteur (p.ex. Badre & Wagner, 2007; Chambers, Garavan, & Bellgrove, 2009; Vidal, Mills, Pang, & Taylor, 2012). Les résultats de la recherche de Masson et al. (2014) montrent aussi que les experts activent davantage que les novices le CPVL gauche lorsqu'ils évaluent des stimulus incongruents, ou naïfs pour respecter la terminologie des auteurs, relatifs à des circuits électriques. En somme, les résultats semblent indiquer que les élèves ayant une meilleure capacité à mobiliser les conceptions scientifiques ont recours au contrôle inhibiteur pour bloquer les conceptions spontanées tentantes, mais inappropriées dans le contexte d'une tâche scientifique, et sélectionner les conceptions scientifiques.

## 4.2 La discussion

L'intention de cette dernière section est de faire un retour sur l'hypothèse de recherche et ensuite de discuter des résultats et ce qu'ils apportent pour mieux comprendre les élèves qui éprouvent davantage de difficultés conceptuelles en sciences, en plus de présenter des implications théoriques des résultats sur les travaux portant sur la mobilisation des conceptions en sciences. Les principales limites de cette recherche sont aussi présentées. Enfin, des retombées éducatives et des perspectives de recherche sont proposées.

### 4.2.1 Le retour sur l'hypothèse de recherche

En somme, les résultats obtenus mènent à penser que les élèves des deux groupes réalisent un travail cérébral en partie distinct et qu'ils activent différemment (avec plus ou moins d'intensité) certaines régions cérébrales lorsqu'ils évaluent l'exactitude d'énoncés congruents ou incongruents. Il semble en effet que les élèves du GrF, tout comme les experts en sciences (Brault Foisy et al., 2015; Masson et al., 2014; Nelson et al., 2007), montrent des activations dans les régions préfrontales ventrolatérale et dorsolatérale qui sont en lien avec le contrôle inhibiteur lorsqu'ils évaluent des énoncés

incongruents. À l'inverse, l'évaluation d'énoncés congruents semble reposer sur des régions plus liées à des stratégies sensorielles et automatiques qui ne sont pas en lien avec les fonctions exécutives. L'activation plus importante du CPDL et dans une certaine mesure du CPVL est cohérente avec l'idée selon laquelle les élèves ayant de la facilité effectuent effectivement une mobilisation plus sélective ou contrôlée des conceptions lorsque les énoncés sont incongruents, c'est-à-dire incompatibles avec les conceptions spontanées. Il semble donc nécessaire pour ces élèves de bloquer celles-ci pour être en mesure de mobiliser la conception scientifique et fournir une réponse scientifiquement appropriée. **Cette transition d'une mobilisation plus automatique (énoncés congruents) vers une mobilisation plus contrôlée (énoncés incongruents) des conceptions ne s'observe pas de manière significative chez les élèves ayant des difficultés conceptuelles.**

L'hypothèse de recherche est donc en partie confirmée par l'activation plus importante du CPDL et du CPVL qui sont identifiés (sans égard nécessairement à leur latéralisation) dans un nombre important de recherches portant sur le contrôle inhibiteur (p.ex. Aron et al., 2014a; Bush et al., 1998; Monchi et al., 2001). Toutefois, les résultats ne montrent pas une activation plus importante du CCA. Comme il a été mentionné à la section 2.3.1, le CCA jouerait un rôle moins central que le CPDL et le CPVL dans le contrôle inhibiteur. L'activation du CCA serait plutôt associée au *monitoring* ou à la détection du conflit entre des conceptions concurrentes (p.ex. Garavan, 2002; MacDonald et al., 2000), une étape en quelque sorte préalable à l'inhibition d'une réponse ou d'une action. Néanmoins, si la détection de conflit semble nécessaire pour engager les régions préfrontales dans l'activation du contrôle inhibiteur, il est raisonnable de se demander pourquoi cette région n'est pas plus activée chez les élèves ayant de la facilité.

Le fait que le CCA ne soit pas plus activé chez les élèves ayant de la facilité semble à première vue indiquer que ceux-ci n'ont pas davantage eu recours au contrôle

inhibiteur. Or, il est important ici d'insister sur le fait que l'absence de différence significative ne signifie pas que les élèves ayant de la facilité n'activaient pas cette région cérébrale. Elle suggère plutôt que les élèves ayant de la facilité n'activaient pas significativement plus le CCA que les élèves ayant des difficultés ou pour une condition par rapport à l'autre.

Une interprétation possible à cette absence de différence significative est que les élèves des deux groupes, ayant reçu les mêmes consignes, étaient dans un état de vigilance ou de détection de conflit similaire. Tous les participants ont en effet reçu la consigne de déterminer si les énoncés étaient scientifiquement corrects. Ils ont donc probablement tous déduit que certains énoncés seraient incorrects et cela aurait été suffisant pour les placer dans un état de détection de conflits. Les participants des deux groupes activent donc possiblement le CCA avec une intensité équivalente ce qui empêche d'observer une différence significative. En d'autres mots, les élèves des deux groupes étaient en questionnement quant à la valeur de vérité scientifique des énoncés et la preuve c'est que même les élèves ayant des difficultés ont parfois répondu de manière scientifiquement appropriée.

Une deuxième interprétation possible et complémentaire est que les élèves ayant des difficultés ont détecté ou perçu que les énoncés incongruents étaient « problématiques » ou « incertains », donc ils activaient un processus de détection de conflits et par conséquent le CCA. Toutefois, ils étaient difficilement capables d'inhiber la réponse scientifiquement inappropriée et sélectionner la réponse scientifiquement appropriée. Ce pourrait être pour cette raison que le CPVL et le CPDL gauches sont moins activés que dans le groupe d'élèves ayant plus de facilité.

Une étude a d'ailleurs obtenu des résultats allant en ce sens. De Neys, Cromheeke et Osman (2011) ont voulu vérifier si les participants donnent des réponses scientifiquement inappropriées à des questions qui impliquent des conceptions

spontanées parce qu'ils ignorent qu'ils commettent une erreur ou parce qu'ils n'arrivent pas à contrer la réponse scientifiquement inappropriée. Leurs résultats montrent que le niveau de confiance diminuait lorsqu'ils donnaient une réponse spontanée plutôt que logique. Il est donc possible que même lorsque des participants ne réussissent pas à inhiber une réponse spontanée ils puissent se trouver dans un état de détection de conflit. C'est du moins ce que suggère une autre étude en IRMf (De Neys, Vartanian, & Goel, 2008) qui montre que le CCA est autant activé lorsque les participants fournissent des réponses appropriées qu'inappropriées, mais que les régions préfrontales n'étaient activées que lorsqu'ils répondaient de manière appropriée.

Le fait que le CCA ne soit pas davantage activé ne semble donc pas permettre de discréditer l'hypothèse d'une activation plus importante du contrôle inhibiteur chez les élèves ayant plus de facilité à mobiliser les conceptions scientifiques. Les élèves des deux groupes anticipaient et se préparaient probablement tous les deux à une situation de conflit en raison de la nature des consignes données. Les élèves du GrF activent toutefois davantage le CPDL qui permettrait d'amener en mémoire de travail et de sélectionner les informations nécessaires à la résolution du conflit et le CPVL qui inhiberait la réponse scientifiquement inappropriée. Les élèves des deux groupes auraient donc été dans un état de préparation au contrôle inhibiteur similaire, mais le GrF aurait davantage activé des régions préfrontales associées aux étapes subséquentes, c'est-à-dire la manipulation des conceptions et leur contrôle. Bien que cette interprétation puisse sembler intéressante, il est important de rappeler que le devis de recherche ne permettait pas d'observer le décours temporel de l'activation du contrôle inhibiteur et qu'il s'agit d'hypothèses qui nécessitent d'être vérifiées par d'autres recherches.

### Réfutation d'interprétations alternatives

Les résultats ont pour l'instant été interprétés en lien avec l'hypothèse de recherche voulant que les élèves ayant plus de difficulté à mobiliser les conceptions scientifiques sous-activent le contrôle inhibiteur par rapport à d'autres ayant plus de facilité. Néanmoins, il est possible d'envisager que les élèves ayant de la facilité n'activent pas davantage le contrôle inhibiteur que les élèves ayant des difficultés, mais que les deux groupes ont plutôt recours à des stratégies radicalement différentes. Des recherches ayant comparé l'activité cérébrale lors de différentes stratégies de résolution de problèmes en mathématiques (p. ex. Grabner et al., 2009) indiquent par exemple que des stratégies différentes (récupération en mémoire de faits arithmétiques ou stratégie procédurale) sont associées à des patrons d'activité cérébrale distincts.

Or, comme le montrent l'effet d'interaction et les contrastes subséquents, l'activation de régions associées au contrôle inhibiteur est plus importante lorsque les élèves ayant de la facilité répondent à des énoncés incongruents par rapport aux énoncés congruents. Par contre, aucune différence n'est observée chez les élèves ayant des difficultés pour chacune des conditions par rapport à l'autre. Si les deux groupes avaient utilisé des stratégies distinctes, les résultats de l'effet d'interaction auraient montré l'activation de régions cérébrales qui auraient pu être davantage activées chez les élèves ayant des difficultés pour chacune des conditions par rapport à l'autre. De plus, si les deux groupes avaient eu recours à des stratégies différentes pour répondre à des énoncés incongruents par rapport à des énoncés congruents, les résultats auraient aussi montré des différences dans l'activité cérébrale des élèves ayant des difficultés pour les contrastes (incongruent > congruent et congruent > incongruent).

La figure 4.3 montre d'ailleurs que non seulement les élèves du GrD n'activent pas davantage le contrôle inhibiteur lors de l'évaluation d'énoncés incongruents, mais ils semblent l'activer encore moins que pour les énoncés congruents, ce qui suggère qu'ils

n'ont effectivement pas effectué la transition entre une mobilisation spontanée et une mobilisation contrôlée des conceptions. Les résultats laissent donc bien entendre que les élèves ayant de la facilité n'utilisent pas une stratégie distincte des élèves ayant des difficultés et vice versa, mais que les élèves ayant de la facilité ont plutôt recours de manière plus importante au contrôle inhibiteur.

#### 4.2.2 Le contrôle inhibiteur et difficultés conceptuelles

Les résultats de cette recherche mènent à penser que les difficultés que certains élèves éprouvent à mobiliser les conceptions pour donner une réponse scientifiquement appropriée sont associées à une sous-activation du contrôle inhibiteur. Il semble donc que pour ces élèves il soit plus difficile de contrôler l'activité dans les réseaux de neurones rattachés aux conceptions spontanées qui sont reconnus comme persistants, résistants et automatiquement activés. La prédominance de ces réseaux de neurones peut s'expliquer notamment par le modèle de Hebb (1949) qui est toujours aujourd'hui l'un des principes à la base de notre compréhension du lien entre le cerveau et l'apprentissage. Selon ce modèle, les connexions des réseaux de neurones qui s'activent de manière répétée se renforcent ou se consolident progressivement. Il est donc fort probable que plusieurs conceptions spontanées qui sont utiles et appropriées dans le contexte quotidien bénéficient d'un tel renforcement. La formation des réseaux de neurones rattachés aux conceptions spontanées se consoliderait donc par l'utilisation récurrente de celles-ci et il en résulterait une augmentation de leur efficacité.

Potvin (2011) illustre cette idée en comparant le cerveau à une forêt. Dans son analogie, il propose de se représenter les innombrables réseaux de neurones comme formant autant de sentiers d'une forêt difficile à traverser. Or, parmi tous les sentiers de cette forêt, certains sont plus dégagés et plus faciles à emprunter. Les réseaux de neurones rattachés aux conceptions spontanées feraient partie de ces sentiers mieux creusés puisqu'ils se sont avérés utiles dans de multiples contextes et qu'ils ont par conséquent

été empruntés à maintes reprises pour devenir peu à peu automatisés. Les réseaux de neurones rattachés aux conceptions scientifiques seraient quant à eux des sentiers moins empruntés. Ils sont plus lents et plus difficiles à parcourir. Ils rivalisent donc difficilement avec les sentiers des conceptions spontanées, même à la suite d'efforts pédagogiques qui incitent à les mobiliser fréquemment. Le défi est de taille, comme l'écrit Bachelard (1934, p. 14), car « 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. ». Lors de l'apprentissage des plusieurs concepts scientifiques, le cerveau des élèves ne serait donc pas une forêt vierge où se tracent de nouveaux chemins, mais une forêt mature où il faut apprendre à défricher et à s'orienter quand les chemins ne mènent pas là où l'éducation scientifique le voudrait.

L'idée que les conceptions puissent être rattachées à des réseaux neuronaux distincts, certains étant plus automatiquement activés et d'autres étant plus lents, est d'ailleurs similaire à ce que proposent plusieurs écrits en sciences cognitives qui ont fait naître les « *dual process theories* » (De Neys, 2006; Evans, 2010; Stanovich, 2011). Selon ces modèles, un raisonnement spontané peut cohabiter avec un second type plus lent et nécessitant un contrôle conscient. Le premier type de raisonnement est un système (système 1) pouvant traiter intuitivement l'information alors que le deuxième type est un système (système 2) qui traite davantage les connaissances explicites. Certains chercheurs, dont Evans (2010) et Houdé (2014), proposent en plus l'existence d'un troisième type de raisonnement, le système 3, qui serait responsable d'envoyer un signal pour découpler les opérations cognitives lorsqu'un conflit est détecté entre le système 1 et le système 2.

Bien que ces modèles réfèrent à des raisonnements, des stratégies de traitement de l'information, et non pas directement à des conceptions qui sont plus des représentations du monde, il semble tout de même qu'un parallèle se dresse entre les systèmes duaux et la coexistence des conceptions. En effet, dans les deux champs les

chercheurs observent la persistance de raisonnements intuitifs (système 1) ou de conceptions spontanées qui semblent s'activer automatiquement. Ce type de raisonnement serait plus économique du point de vue cognitif, tout comme les conceptions spontanées peuvent l'être en raison de leur grand pouvoir explicatif dans de nombreux contextes autres que scientifiques. Le raisonnement analytique (système 2), plus lent et plus exigeant, est à l'image des conceptions scientifiques qui sont coûteuses à mobiliser, mais appropriées dans le contexte scientifique.

Sans nommer explicitement le contrôle inhibiteur, plusieurs écrits sur les théories des systèmes duaux font référence à un mécanisme de contrôle, le système 3, qui détecte les situations de conflits entre les systèmes 1 et 2. En effet, plusieurs travaux ont montré que dans de nombreux cas les erreurs de raisonnement ne sont pas attribuables à une absence de capacités cognitives, mais plutôt à l'utilisation inadéquate d'un raisonnement de type intuitif (p.ex. Borst, Poirel, Pineau, Cassotti, & Houdé, 2013; Houdé et al., 2000; Houdé & Borst, 2015). Les résultats de cette recherche vont dans le même sens et indiquent que le contrôle inhibiteur serait associé à la capacité à mobiliser les conceptions scientifiques, et donc que les difficultés conceptuelles ne relèvent pas nécessairement d'un manque de connaissance, mais peuvent aussi être rattachés à une sous-activation du contrôle inhibiteur.

Dans l'ensemble, les résultats de cette recherche mènent à penser que certains élèves auraient plus de difficultés à s'orienter dans cette « forêt » cérébrale. Ces élèves ont en effet démontré une capacité plus faible à mobiliser les conceptions scientifiques et seraient possiblement moins outillés pour exercer une sélection et un contrôle des sentiers à emprunter. Les résultats semblent donc appuyer l'idée que certains élèves ont donc une moins grande capacité à bloquer leurs conceptions spontanées pour arriver à mobiliser les conceptions scientifiques. Certains élèves arriveraient donc plus difficilement à réaliser un travail de comparaison des conceptions rattachées à des réseaux neuronaux en partie distincts, pour ensuite inhiber ou bloquer l'activation

intuitive et automatique du réseau neuronal rattaché à la conception spontanée et ainsi mobiliser une conception scientifique. Cette capacité repose notamment sur un travail cérébral particulier qui consiste à activer des régions préfrontales dorsolatérales et ventrolatérales et par conséquent les élèves ayant des difficultés conceptuelles démontrent une sous-activation de ces régions.

Il est toutefois possible d'envisager d'autres facteurs pouvant expliquer pourquoi les élèves ayant des difficultés conceptuelles sous-activent des régions associées au contrôle inhibiteur. Les élèves ayant des difficultés conceptuelles ont possiblement une plus faible capacité générale de contrôle inhibiteur. En effet, plusieurs recherches tendent à démontrer des différences individuelles importantes au niveau des fonctions exécutives, dont le contrôle inhibiteur (Vosniadou et al., 2015). Certaines études portant notamment sur des jumeaux ont observé une forte influence de facteurs hautement héréditaires sur la capacité d'inhibition (Friedman et al., 2008; Miyake & Friedman, 2012). D'autres études ont obtenu des résultats allant dans le même sens et ont identifié un lien entre des patrons sulcaux (la morphologie des sillons) du cortex cingulaire antérieur (CCA) et l'efficacité du contrôle inhibiteur (Borst et al., 2014; Cachia et al., 2014). Les patrons ou les plis du CCA sont hérités et sont stables tout au long de la vie. Ces résultats suggèrent donc que les caractéristiques innées du cerveau puissent avoir un impact sur les besoins des élèves quant aux apprentissages nécessitant le contrôle inhibiteur. Il se peut donc que les difficultés conceptuelles observées chez certains élèves puissent être attribuables à certains facteurs héréditaires.

Il est aussi possible de penser que les élèves ayant des difficultés conceptuelles sont moins aptes à inhiber en raison d'une moins grande appropriation des connaissances scientifiques. Ces élèves pourraient avoir plus de difficultés à inhiber les conceptions spontanées, car ils seraient moins aptes à comparer les conceptions scientifiques et spontanées et manipuler l'information qui leur est associée. En d'autres mots, les difficultés des élèves pourraient aussi être associées à une moins bonne compréhension

des conceptions scientifiques et de ce qui les distingue des conceptions spontanées dans certains contextes. Les facteurs motivationnels pourraient également être en jeu. Les élèves ayant des difficultés pourraient avoir développé une compréhension équivalente des concepts, mais leur motivation plus faible fait en sorte qu'ils ne fournissent pas l'effort nécessaire pour inhiber les conceptions spontanées. Or, ces hypothèses, bien qu'intéressantes, ne peuvent pas être vérifiées par les résultats actuels. Elles suggèrent notamment de mener d'autres études où certaines variables (p.ex. sentiment de compétence, attitude, intérêt, etc.) seraient prises en compte. Des perspectives de recherches allant en ce sens sont discutées à la fin de ce chapitre.

#### 4.2.3 Le contrôle inhibiteur et la mobilisation des conceptions

Au deuxième chapitre, plusieurs travaux inscrits dans une perspective de mobilisation des conceptions ont été présentés (voir section 2.1.4). Il ressortait de cette présentation que la persistance des conceptions spontanées peut provenir d'une difficulté à faire coexister les conceptions et à mobiliser les conceptions appropriées. Les chercheurs inscrits dans cette perspective font généralement consensus à l'effet que les conceptions spontanées sont plus facilement accessibles que les conceptions scientifiques et qu'elles peuvent mener dans certains cas à des réponses scientifiquement inappropriées si les élèves ne parviennent pas à comparer les conceptions en jeu et à contrôler les conceptions spontanées plus automatiquement activées. Ces écrits sont revus ici à la lumière des résultats de cette recherche afin de discuter de la place et du rôle du contrôle inhibiteur dans les processus de mobilisation des conceptions.

L'idée principale qui ressort de cette étude est que les difficultés que certains élèves éprouvent à mobiliser les conceptions scientifiques sont associées à une sous-activation du contrôle inhibiteur. En effet, il semble que les élèves qui possèdent une meilleure capacité à mobiliser les conceptions scientifiques activent davantage le contrôle

inhibiteur lorsqu'ils se retrouvent dans une situation de conflit entre deux ou plusieurs réponses possibles, c'est-à-dire dans une situation incongruente. Le développement d'une compréhension conceptuelle passerait non seulement par l'apprentissage formel des concepts scientifiques, mais aussi par le recours à un mécanisme cérébral permettant d'inhiber les conceptions inappropriées dans certains contextes. Ces résultats peuvent d'ailleurs s'arrimer de différentes façons aux travaux qui ont étudié divers aspects des processus de mobilisation des conceptions.

#### 4.2.3.1 Les mécanismes de mobilisation basés sur les marqueurs contextuels (*cues*)

Certains travaux ont proposé des mécanismes de mobilisation des conceptions scientifiques basés sur les *cues*, c'est-à-dire des marqueurs contextuels. Pour Larochelle et Désautels (1992) par exemple, la capacité à mobiliser les conceptions scientifiques prend racine dans une remise en question. Ce questionnement proviendrait de l'adoption, par les élèves, d'une perspective épistémologique à l'égard de la valeur de leur propre savoir qui contribue à développer un rapport plus ou moins émancipatoire au savoir scientifique. Cette perspective critique permettrait de mieux opérer la discrimination entre les différents jeux de la connaissance : ceux régissant les conceptions de la vie quotidienne (connaissance ordinaire) et ceux derrière les conceptions scientifiques (connaissance scientifique). Ces travaux sont donc principalement préoccupés par le développement chez les élèves d'une compétence épistémologique qui lui permet de passer d'un jeu à l'autre de manière avertie. Les résultats de cette recherche doctorale suggèrent que cette vigilance puisse reposer du moins en partie sur le contrôle inhibiteur. Il est possible d'envisager que les élèves recrutés dans le GrF à mobiliser des conceptions adoptent davantage une perspective épistémologique et ont donc pu percevoir dans la tâche cognitive les énoncés qui demandaient de passer du jeu de la connaissance ordinaire qui suffit à répondre aux énoncés congruents au jeu de la connaissance scientifique requis pour répondre aux énoncés incongruents. À l'inverse, les élèves ayant des difficultés n'ont possiblement

pas réalisé une prise de conscience aussi explicite de leur posture épistémologique et ils sont donc moins critiques ou moins vigilants à l'égard de l'utilisation des différents jeux de la connaissance. En somme, selon ce modèle, le contrôle inhibiteur passe essentiellement par une sophistication ou une prise de conscience épistémologique. Or, les participants avaient, selon toute vraisemblance, tous compris à partir des consignes qu'on leur demandait de jouer le jeu de la connaissance scientifique. Il semble donc que les signaux épistémologiques ne soient pas suffisants pour expliquer la sous-activation du contrôle inhibiteur chez les élèves ayant des difficultés conceptuelles.

Solomon (1983) a proposé un modèle basé sur des marqueurs contextuels (*cues*) linguistiques selon lequel pour mobiliser les conceptions scientifiques, l'élève doit apprendre à distinguer les contextes de validité de chaque type de conception. Comme plusieurs auteurs, Solomon (1983) reconnaît que les conceptions spontanées sont appropriées dans certains contextes. Mobiliser les conceptions scientifiques requiert ainsi une compréhension de la différence entre la pensée quotidienne et la pensée scientifique. L'élève doit donc apprendre à distinguer les contextes de validité de chaque type de conception, notamment en prenant appui sur des marqueurs contextuels (*cues*) qui l'aident à distinguer dans quel contexte, ou manière particulière de voir le monde, il se trouve. La difficulté réside, selon Solomon (1983), dans le fait qu'il y a une asymétrie entre les mondes ordinaires et scientifiques de la connaissance. Le monde ordinaire est accédé en premier alors que le monde scientifique est accédé de manière plus fragile. Les *marqueurs contextuels* encouragent le passage, temporaire, vers le monde scientifique, mais ceux-ci ne sont pas suffisants. Le contrôle inhibiteur pourrait aussi jouer un rôle dans le passage entre les mondes asymétriques de la connaissance ordinaire et scientifique.

Dans cette recherche, les deux conditions de la tâche étaient équivalentes, c'est-à-dire qu'elles contenaient des *marqueurs contextuels* similaires. Il est donc peu probable que les *marqueurs contextuels* aient favorisé l'activation plus importante du contrôle

inhibiteur chez les élèves ayant de la facilité. Il est plus probable d'envisager que ces élèves aient, comme le propose Solomon (1983), davantage appris à apprécier comment les différentes « manières de voir le monde » sont appropriées dans des contextes spécifiques. Ces élèves auraient mieux appris à distinguer les contextes, et cet apprentissage est possiblement rattaché à l'activation du contrôle inhibiteur. En contrepartie, si certains élèves développent moins cette capacité à distinguer les contextes de validité, c'est qu'ils ont possiblement des besoins éducatifs différents. Les élèves ayant des difficultés conceptuelles pourraient notamment bénéficier de *marqueurs contextuels* plus nombreux ou d'un enseignement plus explicite des contextes de validité des conceptions pour arriver à activer le contrôle inhibiteur et mobiliser les conceptions scientifiques.

#### 4.2.3.2 Les mécanismes de mobilisation basés sur l'évaluation du « coût cognitif »

Pour Ohlsson (2009), le recours plus automatique aux conceptions spontanées serait attribuable à une utilisation d'une règle, une théorie informelle, dans un contexte où elle présente une bonne utilité cognitive, mais insuffisante dans le domaine scientifique. L'utilité cognitive serait attribuée en fonction du succès passé de la conception et du coût associé à l'utilisation de la structure de connaissances. Les difficultés de mobilisation des conceptions seraient donc l'effet secondaire d'une course entre les différentes conceptions pour expliquer au mieux à la fois les expériences personnelles et le discours scientifique. La mobilisation des conceptions scientifiques reposerait sur une « évaluation compétitive » où les conceptions spontanées prédominent en raison de leur plus grand pouvoir explicatif. Cette évaluation repose sur le coût qui prend notamment en compte la charge cognitive et le temps de réalisation de la tâche par rapport au bénéfice qui est le degré de satisfaction envers la mobilisation d'une conception donnée.

Il pourrait donc y avoir un lien entre un mécanisme basé sur l'« évaluation compétitive » et l'activation du contrôle inhibiteur. Les élèves ayant des difficultés conceptuelles ont possiblement évalué le coût de la mobilisation des conceptions scientifiques trop élevé par rapport au bénéfice. Il est envisageable qu'ils aient évalué que la charge cognitive associée à la mobilisation de la conception scientifique ait été trop grande par rapport au temps de réalisation perçu pour la tâche ou encore par rapport au bénéfice envisagé. Dans cette perspective, le contrôle inhibiteur aurait été moins mobilisé car la tâche aurait été jugée trop difficile cognitivement dans le temps permis et possiblement le contexte de la participation à une recherche qui peut être source de stress. Les élèves ayant des difficultés conceptuelles ont hypothétiquement une moins grande capacité à réaliser une « évaluation compétitive » et leurs réponses reposent donc davantage sur les conceptions spontanées ayant un plus grand pouvoir explicatif.

Une autre explication à envisager serait celle voulant que, pour les élèves ayant des difficultés conceptuelles, le ratio de la charge cognitive nécessaire pour mobiliser la conception scientifique par rapport aux ressources cognitives disponibles n'est pas propice ou de nature à entraîner la mobilisation de la conception scientifique. En effet, la charge cognitive est potentiellement plus élevée pour les élèves ayant des difficultés puisque la mécanique conceptuelle derrière la conception scientifique est moins automatisée, elle est formée de plusieurs éléments plus ou moins bien intégrés. Par conséquent, la mémoire de travail est davantage sollicitée et la mobilisation est plus longue à opérer. De plus, les élèves ayant des difficultés sont possiblement plus stressés par la tâche, car elle touche des disciplines qu'ils savent probablement ne pas maîtriser parfaitement. Ce ratio plus faible ferait en sorte que les élèves ayant des difficultés auraient peu de ressources cognitives disponibles pour se permettre de sélectionner puis d'utiliser la conception scientifique.

#### 4.2.3.3 Les mécanismes de mobilisation basés sur les alertes

Potvin (2013) a quant à lui proposé un mécanisme de mobilisation basé sur les alertes. Dans ce modèle, le lien entre le contrôle inhibiteur et la mobilisation des conceptions spontanées est en quelque sorte naturel puisque l'idée de prévalence est notamment inspirée des travaux sur les mécanismes cérébraux associés à l'expertise en sciences (Brault Foisy, Ahr, Masson, Houdé, & Borst, 2017b; Dunbar & Stein, 2007; Masson et al., 2014; Nelson et al., 2007). Comme le fait Ohlsson (2009), Potvin (2013) avance l'idée que la mobilisation d'une conception repose sur un processus « compétitif » entre les conceptions spontanées et scientifiques. Pour les élèves ayant des difficultés conceptuelles, les conceptions spontanées, plus familières, constitueraient possiblement un obstacle plus important puisqu'ils auraient une tendance plus forte à attribuer de la valeur aux éléments connus (Gigerenzer & Goldstein, 1996). Par conséquent, ils ont aussi plus de difficulté à mobiliser les conceptions scientifiques appropriées qui s'accompagnent d'un contrôle des conceptions qui est explicitement nommé par Potvin (2013) comme étant le contrôle inhibiteur. Or, une alerte qui indique la présence d'un piège, c'est-à-dire une situation incompatible avec la conception spontanée du phénomène naturel, pourrait aider les élèves à activer le contrôle inhibiteur dans une situation où des conceptions entrent en conflit. Contrairement aux *marqueurs contextuels* qui sont des signaux qui incitent à mobiliser les conceptions scientifiques, les alertes seraient davantage des signaux dissuasifs, c'est-à-dire des signaux qui encouragent à bloquer une conception spontanée inappropriée dans un contexte donné. Pour Potvin (2013), si le travail visant à faire prévaloir, c'est-à-dire rendre disponible à l'élève, les conceptions scientifiques a été réalisé, il serait possible d'envisager d'intervenir auprès des élèves ayant des difficultés conceptuelles à partir d'alertes prévenant de situations incongruentes qui permettraient de développer leur capacité à mobiliser les conceptions. À l'inverse, les élèves ayant davantage de facilité ont possiblement une prédisposition ou ont davantage internalisé cette vigilance et ils

ont par conséquent moins besoin de développer leur capacité à bloquer les conceptions spontanées.

#### 4.2.3.4 Sommaire sur les mécanismes de mobilisation

Certains auteurs semblent proposer des mécanismes de mobilisation incitatifs. Il s'agit notamment des indices épistémologiques et sociologiques (termes, attitude) proposés par Larochelle et Désautels (1992) ou encore des *marqueurs contextuels* de Solomon (1983). Ceux-ci incitent l'élève à passer du monde ordinaire, fréquent et accessible, vers le monde de la compréhension scientifique. Dans la tâche cognitive utilisée dans cette recherche, les mécanismes incitatifs semblent avoir été utilisés de manière équivalente dans l'ensemble des deux conditions (congruente et incongruente) pour les deux groupes d'élèves. De par la nature de l'expérimentation et de l'environnement de type « laboratoire », les élèves avaient aussi accès de manière équivalente à des indices sociologiques (présence de chercheurs et langage formel), des indices terminologiques (utilisation de termes scientifiques) ainsi qu'à des *marqueurs contextuels* puisque les énoncés référaient à des concepts qui proviennent du monde de compréhension scientifique (p.ex. atome, énergie thermique, ondes radio, etc.). De plus, la consigne donnée mentionnait explicitement que l'attente était de juger de l'exactitude scientifique des énoncés. Les différences observées entre les deux groupes d'élèves ne sont donc vraisemblablement pas influencées de manière significative par les mécanismes incitatifs puisqu'ils ont été contrôlés expérimentalement. Par conséquent, les « marqueurs contextuels » (Mattos, 2014) ont vraisemblablement offert des chances équivalentes aux deux groupes d'élèves de détecter les différents signaux qui auraient dû leur indiquer de sélectionner une réponse issue de la conception scientifique. Or, cela ne veut pas dire qu'ils ont réagi de la même façon à ces marqueurs. Il aurait possiblement fallu des marqueurs encore plus explicites pour les élèves ayant des difficultés comme des signaux mentionnés de manière plus claire et répétée.

Des auteurs ont proposé des formes plus dissuasives de ces mécanismes, c'est-à-dire des mécanismes qui semblent décourager la mobilisation d'une conception spontanée, comme des avertissements (Houdé et al., 2000) ou des alertes émotives (Potvin, 2013). Alors que les mécanismes incitatifs s'apparentent plus à des mécanismes externes (i.e. perçus du contexte), les mécanismes dissuasifs semblent davantage « internes » puisqu'ils sont non formulés, non apparents et qu'ils résultent possiblement d'un apprentissage ou d'une internalisation. De ce point de vue, il est possible d'envisager que les élèves ayant plus de facilité puissent activer ces mécanismes de manière intrinsèque en repérant eux-mêmes un piège ou un conflit entre leurs conceptions.

Enfin, Ohlsson (2009) propose un mécanisme de mobilisation qui repose sur une évaluation du rapport coûts/bénéfices. Il s'agit d'une idée fort similaire à ce qu'a proposé Bélanger (2008) à l'effet que pour mobiliser des conceptions appropriées, dans ce cas-ci scientifiques, l'élève doit fournir un effort important d'évaluation de ses possibilités conceptuelles. L'idée d'une « évaluation compétitive » intègre les mécanismes incitatifs et dissuasifs au sein d'un modèle du processus décisionnel qui accompagne la mobilisation d'une conception. En effet, pour réaliser cette évaluation, l'élève tiendrait compte de l'importante de produire une bonne réponse ou du gain associé à la réussite de la tâche. Pour ce faire, il peut tenir compte à la fois d'éléments perçus du contexte (les consignes, la rétroaction, etc.), donc incitatifs ou encore d'éléments plus internes (sa compréhension des limites de ces conceptions spontanées et de leur contexte de validité) qui sont plus dissuasifs. Le modèle d'Ohlsson (2009) mène à envisager des manières d'intervenir auprès des élèves ayant des difficultés conceptuelles en tentant d'améliorer la perception des bénéfices et de minimiser la perception des coûts de la mobilisation d'une conception scientifique. Il pourrait par exemple être possible d'améliorer l'importance accordée à la production d'une réponse scientifiquement appropriée en offrant une rétroaction à l'élève ou encore d'offrir un temps perçu suffisant ainsi qu'un contexte qui minimise le stress pour maximiser les ressources cognitives disponibles.

En somme, le contrôle inhibiteur semble être faire partie du processus d'apprentissage des concepts scientifiques et plus particulièrement des mécanismes de mobilisation des conceptions scientifiques. Des recherches en avaient déjà fait la démonstration en comparant des adultes ayant des niveaux de formation scientifique différents (Dunbar & Stein, 2007; Kelemen et al., 2012; Masson et al., 2014). Toutefois, aucune recherche n'avait encore contribué à mieux comprendre la place du contrôle inhibiteur dans les mécanismes de mobilisation des conceptions chez des élèves ayant une formation comparable.

#### 4.2.4 Les principales limites de la recherche

Malgré toutes les précautions méthodologiques qui ont été prises, cette recherche comporte certaines limites qui peuvent inciter à davantage de prudence à l'égard de certains aspects de l'interprétation des résultats.

##### 4.2.4.1 Limites générales de la recherche

L'identification des limites de cette recherche découle de la question centrale qui est la suivante : l'activité cérébrale plus importante dans le CPDL et le CPVL gauches chez les élèves ayant de la difficulté à mobiliser les conceptions spontanées est-elle réellement la conséquence d'une plus grande activation du contrôle inhibiteur?

La principale limite de la recherche concerne l'échantillonnage. En effet, il est possible qu'en ayant recruté des élèves à la fin de la scolarité obligatoire, ceux qui sont les plus susceptibles d'éprouver des difficultés aient été écartés de la recherche. Si la recherche avait porté sur des élèves plus en difficulté, les résultats auraient possiblement été plus puissants statistiquement. Or, les élèves ayant des difficultés conceptuelles plus importantes ont possiblement d'autres difficultés d'apprentissage (déficit de

l'attention, trouble du comportement, etc.) ce qui aurait pu complexifier le contrôle de variables potentiellement confondantes.

Premièrement, la constitution de l'échantillon sur une base volontaire peut aussi entraîner des biais de la validité externe de cette recherche, c'est-à-dire de représentativité de l'échantillon par rapport à la population dont il est issu. Il est possible que les caractéristiques des élèves qui se sont proposées volontairement pour participer à une recherche en imagerie par résonance magnétique soient différentes de celles des personnes qui ont décidé de ne pas y participer. Le fait que de manière générale les élèves volontaires possèderaient des caractéristiques distinctes (p.ex. confiance en soi, témérité, etc.) aurait donc pu influencer les résultats obtenus. Toutefois, comme le recrutement sur une base volontaire a été utilisé à la fois pour les élèves ayant des difficultés conceptuelles et pour les élèves ayant de la facilité, il semble peu probable que ce facteur soit à l'origine de différences entre les deux groupes. De plus, comme les analyses statistiques reposent sur des comparaisons, ce biais est atténué. Néanmoins, il est possible que ce biais soit plus prononcé dans un groupe par rapport à l'autre, il s'agit donc d'une limite probable de la recherche.

Deuxièmement, bien que certaines variables confondantes aient été contrôlées, le design méthodologique ne permet pas de confirmer que le niveau de compréhension des concepts scientifique est l'unique facteur associé aux différences cérébrales. Les groupes pourraient être différents quant à leurs capacités intellectuelles, à leur capacité d'attention ou à leur capacité de concentration. Pour être en mesure de l'affirmer avec une plus grande certitude, une étude pré-test et post-test aurait été nécessaire. À partir du design actuel de cette recherche, d'autres facteurs associés au parcours scolaire (enseignants, école, absentéisme, etc.) pourraient donc être envisagés pour tenter d'expliquer l'origine des différences cérébrales observées puisque la formation scientifique n'était pas totalement identique. Néanmoins, comme les élèves des deux groupes d'élèves ont reçu une formation scientifique tout de même similaire et qu'ils

proviennent d'écoles, de villes et de milieux socio-économiques diversifiés, l'effet de ces facteurs a été contrôlé au mieux considérant qu'il s'agit d'une étude transversale. De plus, comme une condition contrôle (les énoncés congruents) est comparée à la condition expérimentale (les énoncés incongruents), ces différences sont contrôlées au mieux, compte tenu du devis méthodologique.

D'autres biais méthodologiques peuvent aussi avoir un effet sur les résultats de l'expérimentation de façon relativement imprévisible. La taille de l'échantillon (deux groupes de 12 élèves) relativement petite peut nuire à la puissance statistique des résultats, bien que malgré qu'une puissance statistique restreinte empêche de voir certaines activations, les activations observées resteraient tout de même présentes avec une meilleure puissance statistique. De plus, les analyses à effets aléatoires utilisées sont adaptées à des données provenant de petits échantillons notamment puisque pour être statistiquement significatif, l'effet doit être observé en moyenne chez tous les participants. En plus, bien que les participants n'aient déclaré aucun trouble neurologique, il est possible que certains d'entre eux présentent des troubles d'apprentissage non diagnostiqués. Néanmoins, comme les élèves étaient tous inscrits au cours de l'option sciences de cinquième secondaire, il est peu probable que des participants avaient des troubles sévères puisque le contenu de ces cours sont reconnus comme exigeant au niveau académique. Les participants ont donc fort possiblement des capacités intellectuelles similaires. De plus, la langue maternelle n'a pas fait partie des variables contrôlées entre les deux groupes. Toutefois, les participants ont tous suivi leurs cours de sciences en Français et qu'ils ont réussi à plus de 90 % le test de compréhension du Français écrit (voir Annexe B).

Enfin, la performance des deux groupes à la tâche cognitive n'est pas aussi contrastée qu'il aurait été souhaitable. Idéalement, les élèves ayant des difficultés conceptuelles auraient obtenu un score presque parfait aux énoncés congruents et un score très faible aux énoncés incongruents alors que les élèves ayant de la facilité auraient obtenu un

score presque parfait aux énoncés congruents et incongruents. Or, la tâche cognitive est exigeante en raison de sa longueur (environ 30 minutes) et du nombre de concepts abordés. De plus, il est important de rappeler que les conceptions spontanées recensées ne sont pas présentes chez tous les élèves. Les conceptions spontanées peuvent être variées chez différents individus au sujet d'un même phénomène. Cette variété est cependant limitée et c'est ce qui permet d'étudier les conceptions les plus répandues, bien qu'elles ne sont pas totalement répandues chez tous les élèves. Une alternative aurait été de choisir un nombre restreint de questions et que celles-ci se répètent entre les blocs et les séries. Toutefois, les résultats auraient alors été généralisables à un nombre moins grand de concepts scientifiques et cette recherche visait justement à pallier à cette limite des recherches antérieures. Au final, il en demeure que ce « bruit » dans les données, c'est-à-dire le haut taux de réponses inattendues<sup>12</sup>, pourrait expliquer que les résultats, bien que statistiquement significatifs, ne passent pas le seuil corrigé ( $p_{FWE}$ ) à l'exception des analyses par régions d'intérêt (voir section 4.1.2.3).

#### 4.2.4.2 Limites de l'approche neuroscientifique

En plus des limites générales de cette recherche associées au design méthodologique et à l'échantillonnage, certaines limites découlent aussi du choix de l'approche neuroscientifique. D'abord, cette recherche porte sur un nombre limité de variables. L'objectif étant de vérifier si une variable indépendante, les difficultés conceptuelles, sont associés à une variable dépendante précise, l'activation du contrôle inhibiteur. L'IRMF ne mesure qu'une variable dépendante, c'est-à-dire l'activité cérébrale (l'intensité de la réponse hémodynamique). Or, le phénomène des difficultés conceptuelles est complexe et multidimensionnel. Il n'est pas possible de penser

---

<sup>12</sup> Il s'agit des réponses scientifiquement appropriées des élèves ayant des difficultés et des réponses scientifiquement inappropriées des élèves ayant plus de facilité aux énoncés de la condition congruente.

comprendre les difficultés conceptuelles uniquement à partir de mesures cérébrales. L'approche neuroscientifique apporte un éclairage supplémentaire sur les mécanismes cérébraux mobilisés par les élèves ayant des difficultés, toutefois, les résultats doivent assurément être interprétés à la lumière des résultats obtenus par d'autres approches de recherche qui s'intéressent aussi aux aspects psychologiques, éducatifs et sociaux du phénomène. Comme l'écrivent Sinatra et Mason (2013), pour rendre compte de la complexité des difficultés conceptuelles, l'étude des caractéristiques cognitives, affectives et sociales des élèves doit se faire en interaction. Cette recherche n'a pas la prétention de modéliser les difficultés conceptuelles des élèves, mais plutôt d'approfondir la compréhension du rôle d'un mécanisme cérébral associé à la mobilisation des conceptions scientifiques sur l'expression de ces difficultés.

L'utilisation de l'IRMf contraint aussi le type de tâche qui peut être demandé aux participants. Les questions doivent préférablement être à choix multiple. Aussi, en raison du faible rapport signal sur bruit, les stimulus de chacune des conditions doivent être répétés à au moins 20-30 reprises dans chacune des séries. Cette exigence contraint à utiliser un nombre important de questions qui se répondent en quelques secondes puisque pour assurer le confort du participant il est préférable de limiter la durée de la séance d'IRMf. De plus, la tâche cognitive est loin de représenter tous les contextes où les conceptions peuvent être utilisées en classe (p.ex. démonstration, expérimentation, discussion, etc.). Elle représente davantage une situation d'évaluation puisqu'il était demandé d'évaluer la valeur de vérité d'énoncés concernant des phénomènes naturels et les résultats doivent être compris en ce sens.

En plus, bien que pour des raisons méthodologiques les conceptions aient été classées en deux conditions (congruente et incongruente), du point de vue des travaux sur la persistance des conceptions spontanées, les conceptions ne se limitent pas à un « doublet de conceptions, l'une pour la vie quotidienne et l'autre pour les cours de sciences. À l'intérieur même d'un domaine scientifique, plus d'une conception peut

s'avérer utile pour traiter une situation. » (Bélanger, 2008, p. 112). La tâche cognitive ne rend donc pas compte de la complexité du phénomène des conceptions multiples, c'est-à-dire de l'ensemble des conceptions pouvant coexister dans les structures cognitives d'un élève, et des interactions possibles entre elles.

Enfin, il est important de rappeler que la qualité de l'interprétation des données d'IRMf et leur implication potentielle pour l'éducation est limitée par les connaissances actuelles sur le fonctionnement du cerveau. Les régions cérébrales associées au contrôle inhibiteur ont été identifiées grâce à l'utilisation de tâches en psychologie cognitive dont la tâche de *Stroop* ou le test du tri de cartes du Wisconsin. Or, il est fort possible que les tâches en sciences ne mobilisent pas exactement de la même façon le contrôle inhibiteur. Comme le propose notamment Diamond (2013), le contrôle inhibiteur comporte plusieurs dimensions. À mesure que notre compréhension des dimensions du contrôle inhibiteur impliquées dans l'apprentissage des sciences se raffine, les hypothèses pourront devenir plus précises. Le champ de la neuroéducation, tout comme les autres champs de recherche en éducation, est en constant développement et les résultats sont donc à interpréter avec prudence, et surtout, comme mentionné plus haut, en complémentarité avec d'autres approches de recherches.

#### 4.2.5 Des retombées éducatives

Il convient donc maintenant de présenter les incidences pédagogiques que peut avoir cette meilleure compréhension du lien entre contrôle inhibiteur et difficultés conceptuelles sur l'enseignement des sciences. Les résultats obtenus au niveau comportemental et cérébral suggèrent que les difficultés des élèves à mobiliser les conceptions scientifiques sont associées à une sous-activation du contrôle inhibiteur. Les élèves ayant des difficultés conceptuelles n'ont pas autant ralenti leurs réponses aux énoncés incongruents et ils ont sous-activé des régions cérébrales préfrontales associées au contrôle inhibiteur (CPDL et CPVL) par rapport aux élèves ayant de la

facilité. Il semble donc que la capacité à mobiliser les conceptions scientifiques puisse impliquer le contrôle inhibiteur.

Comme mentionné précédemment (voir section 2.2.2), plusieurs recherches montrent que le contrôle inhibiteur peut jouer un rôle central dans plusieurs apprentissages scolaires dont la logique (Houdé et al., 2000), la géométrie (Babai et al., 2012), l'arithmétique (Lubin et al., 2013), la lecture (Brault Foisy et al., 2017b) et la grammaire (Lanoë et al., 2016). Les résultats de cette recherche permettent de penser que le contrôle inhibiteur joue aussi un rôle dans des apprentissages scolaires en sciences. Il semble effectivement que le contrôle inhibiteur soit sous-activé chez les élèves qui éprouvent des difficultés à mobiliser les conceptions scientifiques. Les symptômes évidents de ces difficultés sont les réponses scientifiquement inappropriées; toutefois, cette recherche montre que derrière ces réponses semble se cacher, entre autres, une difficulté plus fondamentale qui est celle de la mobilisation des conceptions.

Ce lien présumé dans cette recherche entre les difficultés conceptuelles et le contrôle inhibiteur rejoint d'ailleurs certaines idées du paradigme constructiviste selon lequel l'enseignement doit tenir compte des connaissances préalables de l'élève (Smith et al., 1993). Il semble effectivement que, comme les conceptions spontanées persistent et interfèrent dans l'apprentissage des concepts scientifique, certains efforts pédagogiques devraient être orientés vers un enseignement du contrôle inhibiteur, notamment vers l'enseignement de la capacité à reconnaître les limites des contextes de validité des conceptions spontanées.

Or, le concept de contrôle inhibiteur est encore récemment peu utilisé en éducation. Pourtant, plusieurs travaux montrent que cette fonction exécutive est à la base de nombreux apprentissages fondamentaux (Diamond, 2013) et du développement général de l'intelligence et de la pensée formelle (Houdé & Leroux, 2012; Houdé,

2004). Le contrôle inhibiteur est effectivement une fonction exécutive qui fait l'objet de nombreuses discussions scientifiques (Babai, Zilber, Stavy, & Tirosh, 2010; Bush et al., 1998; Houdé, 2013; Menon et al., 2001). Certains chercheurs vont même jusqu'à faire du contrôle inhibiteur la pierre angulaire du développement de l'individu en affirmant qu'« apprendre, c'est apprendre à inhiber » (Houdé, 2014). Dans cette perspective, apprendre n'est pas seulement construire de nouvelles habiletés, mais arriver à inhiber des actions, des connaissances ou des stratégies qui se révèlent inappropriées dans certaines situations. L'idée que le contrôle inhibiteur puisse jouer un rôle dans l'apprentissage des sciences présente donc un potentiel intéressant qui mérite d'être exploré. Il pourrait notamment être intéressant de se questionner sur les façons de favoriser l'activation du contrôle inhibiteur chez les élèves ayant des difficultés. Des résultats de recherche mènent à envisager quelques pistes d'interventions que les enseignements peuvent considérer pour aider les élèves ayant des difficultés en sciences.

Houdé et al. (2000) ont montré qu'une intervention visant à aider les élèves à identifier les pièges d'une tâche en logique amenait les élèves à activer davantage des régions préfrontales associées au contrôle inhibiteur qu'une intervention plus classique orientée vers l'identification de la réponse appropriée. Quant à Babai, Shalev et Stavy (2015), ils ont mis à l'essai une intervention comportant une alerte dans le contexte d'une tâche de comparaison de périmètres de figures géométriques. L'alerte prévenait explicitement les élèves qu'ils pouvaient avoir tendance à comparer l'aire des figures plutôt que le périmètre et que cette tendance pouvait les conduire à commettre des erreurs. Le groupe contrôle recevait une consigne similaire, mais sans l'alerte. Les résultats montrent que les élèves du groupe de l'alerte ont mieux performé que les élèves du groupe contrôle et leurs temps de réponse étaient considérablement plus longs. Ces résultats suggèrent que l'alerte a permis d'activer le contrôle inhibiteur qui a aidé les élèves à surmonter le piège de la tâche. Il semble donc être possible d'améliorer les habiletés de résolution de problème des élèves en géométrie et en

logique en demandant aux élèves d'identifier les pièges ou encore en les avertissant explicitement de l'existence de ceux-ci.

En somme, des interventions de ce genre peuvent être mises en place relativement facilement et pourraient être utilisées en complément aux approches qui visent l'apprentissage formel des concepts scientifiques. Un enseignement pourrait aussi combiner ces interventions et intégrer à la fois une alerte (p.ex. « Attention! Il est demandé de ..., mais tu pourrais avoir tendance à penser que... ») ainsi qu'un entraînement à l'identification de réponses pièges, c'est-à-dire des réponses qui s'appuient sur des conceptions spontanées qui mènent à fournir des réponses scientifiquement inappropriées. L'alerte pourrait aider les élèves à se placer en état de « détection d'un conflit » ou de doute qui est selon le modèle de Botvinick (2007) une étape préalable à l'inhibition d'une réponse. Par l'identification des réponses pièges, l'élève peut développer un meilleur contrôle sur la mobilisation de certaines conceptions spontanées. L'intention ici est qu'il développe sa capacité à se placer en état de vigilance ou de méfiance à l'égard de ces propres conceptions pour en arriver à les bloquer. Comme mentionné précédemment, l'idée d'un enseignement du contrôle inhibiteur représente donc un point de départ intéressant qu'il serait pertinent d'approfondir dans le contexte de l'apprentissage des sciences.

Les résultats de cette recherche contribuent donc à un domaine de recherche émergent qui aspire à mieux comprendre la nature des difficultés conceptuelles qu'éprouvent certains élèves et entrevoir des façons d'intervenir auprès de ces élèves pour les aider à apprendre les concepts scientifiques. Ils incitent aussi à envisager différemment le « succès » des élèves ayant plus de facilité. Il semble que les élèves qui ont démontré une plus grande capacité à mobiliser les conceptions scientifiques ne doivent pas être perçus comme ayant « complété » un apprentissage. L'activation plus importante du contrôle inhibiteur chez les élèves ayant de la facilité mène plutôt à penser que cet apprentissage n'est pas définitif. Pour le consolider, comme le propose Potvin (2013),

les enseignants auraient avantage à faire *prévaloir* les conceptions scientifiques. Une stratégie pédagogique visant la « prévalence » exige notamment de présenter à l'élève une série de contextes variés dans lesquels ces conceptions sont impliquées, de manière à entraîner l'élève à reconnaître les contextes où son intuition pourrait mener à des erreurs. Ceci permet à l'élève de prendre lui-même conscience des raccourcis empruntés par certains réseaux neuronaux lorsqu'il mobilise des conceptions spontanées. En somme, amener l'élève à mobiliser les conceptions scientifiques par le biais d'exercices variés et répétés pourrait contribuer à ce que la prévalence soit plus durable.

Au final, sachant que la persistance des conceptions spontanées affecte certains élèves plus que d'autres et que, même chez les élèves ayant plus de facilité, les conceptions spontanées peuvent parfois ressurgir avec le temps, la « didactique du contrôle inhibiteur » incite l'enseignant à demeurer vigilant pour sécuriser les apprentissages des élèves. Il peut être nécessaire, comme le proposent Masson et al. (2014), de réaliser des allers-retours entre les conceptions spontanées et scientifiques afin de favoriser l'habileté à systématiquement effectuer un travail de comparaison des conceptions pour en arriver à réaliser une mobilisation contrôlée de la conception appropriée dans un contexte donné. Ces « allers-retours » fréquents visent, pour reprendre l'analogie de la forêt, à creuser les sentiers associés aux conceptions scientifiques (Potvin, 2011) pour ainsi amener les élèves à les utiliser plus facilement. Les résultats de cette recherche suggèrent que certains élèves auraient possiblement besoin de davantage d'« allers-retours » pour développer leur capacité à mobiliser les conceptions scientifiques. Pour ces élèves, les enseignants sont invités à faire usage de leur liberté pédagogique et l'autonomie de leur pratique professionnelle pour organiser un environnement d'apprentissage adapté à ces besoins. Toutefois, d'autres recherches sont nécessaires pour dégager des implications plus précises du contrôle inhibiteur dans le choix des approches pédagogiques à privilégier.

#### 4.2.6 Quelques perspectives de recherche

Il ressort de cette recherche ainsi que d'études antérieures que le contrôle inhibiteur peut jouer un certain rôle dans les difficultés conceptuelles qu'éprouvent les élèves en sciences. Or, pour aspirer à mieux comprendre les implications pratiques potentielles de ces résultats, de nouvelles recherches sont nécessaires dans l'espoir que les retombées puissent être profitables au milieu de l'éducation et, au bout du compte, aux élèves.

##### 4.2.6.1 Mieux comprendre les mécanismes de mobilisation des conceptions

Il sera important de tenter de mieux connaître les processus de mobilisation des conceptions scientifiques. Des recherches pourraient notamment tenter de déterminer ce qui est bloqué ou contrôlé par le contrôle inhibiteur. Les élèves inhibent-ils les conceptions spontanées de manière individuelle ou inhibent-ils par exemple un monde de compréhension tel que l'entend Solomon (1983)? D'autres questions intéressantes concernent la nature des mécanismes de mobilisation. Cette recherche a tenté de positionner le contrôle inhibiteur parmi les mécanismes de mobilisation déjà proposés (p.ex. Mortimer, 1995; Ohlsson, 2009; Solomon, 1983). Or, il s'agit de propositions spéculatives et davantage de recherches sont nécessaires pour mieux comprendre comment les élèves en arrivent à mobiliser les conceptions scientifiques. Ce problème de recherche complexe mérite d'être abordé selon différentes perspectives : neuroscientifique, didactique, psychologique, etc. À ce titre, les travaux sur la prise de décision (*decision making*) pourraient être éclairants.

##### 4.2.6.2 Réaliser un devis méthodologique plus contrôlée

Une des limites de cette étude est qu'elle ne permet pas de confirmer hors de tout doute que la difficulté à mobiliser les conceptions scientifiques est l'unique facteur associé aux différences cérébrales. Pour être en mesure de le vérifier avec une plus grande

certitude, il serait possible de mener une étude pré-test post-test. Une recherche de ce type pourrait mesurer l'activité cérébrale d'élèves avant l'apprentissage de concepts scientifiques. Les élèves recevraient ainsi un enseignement équivalent des mêmes concepts scientifiques. Puis, l'activité cérébrale de ceux qui, après l'enseignement, démontrent des difficultés à mobiliser les conceptions scientifiques serait comparée à celle d'élèves qui démontrent plus de facilité. Il serait également intéressant de tenter de contrôler des variables confondantes qui n'ont pas été prises en compte dans cette recherche, dont les facteurs affectifs, dont la motivation, l'attitude et l'intérêt (Pintrich et al., 1993; Sinatra & Mason, 2013) ou encore des facteurs relatifs à l'épistémologie personnelle des élèves (Larochelle & Désautels, 1992). La capacité générale du contrôle inhibiteur pourrait aussi être contrôlée entre les deux groupes en administrant un test neuropsychologique aux participants (p.ex. Stroop, 1935):

#### 4.2.6.3 Mettre à l'essai des interventions éducatives

Les résultats de recherches pourraient ouvrir la voie à des études plus appliquées qui auraient pour objectif d'identifier les types d'enseignement les plus susceptibles de favoriser la mobilisation du contrôle inhibiteur chez les élèves ayant des difficultés. En effet, il existe à l'heure actuelle des programmes d'intervention visant spécifiquement le développement du contrôle inhibiteur notamment en géométrie et en logique (voir p.ex. Babai et al., 2015; Houdé et al., 2000). Dans des recherches ultérieures, il serait intéressant de vérifier si l'application de certains de ces programmes contribue à une meilleure activation du contrôle inhibiteur et à une meilleure compréhension conceptuelle des sciences.

#### 4.2.6.4 S'intéresser à d'autres difficultés vécues lors de l'apprentissage des sciences

Il serait aussi intéressant de tenter de mieux comprendre les liens entre le cerveau et d'autres difficultés vécues par les élèves en sciences. La compréhension des concepts scientifiques est certes un aspect majeur de l'apprentissage des sciences. Toutefois,

d'autres apprentissages difficiles en sciences mériteraient d'être étudiés du point de vue neuroscientifique. C'est le cas notamment de l'apprentissage du contrôle des variables (Babai & Levit-Dori, 2009), de l'apprentissage du raisonnement causal (Fugelsang & Dunbar, 2005) et de la formulation d'hypothèses (Lee & Kwon, 2012).

#### 4.2.6.5 Aborder les difficultés conceptuelles sous plusieurs dimensions

Les difficultés conceptuelles en sciences ont certainement avantage à être abordées sous différentes perspectives qui peuvent fournir des explications complémentaires sur le phénomène. Des recherches pourraient ainsi s'intéresser aux aspects développementaux de ces difficultés afin de mieux comprendre comment ces difficultés évoluent et affectent l'apprentissage des sciences à différents stades du développement d'un individu. D'autres études pourraient aborder l'effet du contexte social sur l'activation du contrôle inhibiteur. Enfin, des travaux pourraient aussi tenter de développer une perspective plus globale sur les difficultés conceptuelles en tentant de mieux comprendre leur « écosystème », c'est-à-dire comment l'interaction de facteurs individuels, scolaires et sociaux peuvent expliquer les difficultés conceptuelles des élèves en sciences.

En somme, dans certains domaines comme l'apprentissage de la lecture et du calcul, les caractéristiques des élèves ayant des difficultés sont déjà assez bien documentées, que ce soit d'un point de vue social, cognitif ou cérébral. Par contre, en sciences, ce n'est pas encore le cas. Peu de connaissances sont disponibles au sujet des élèves présentant des difficultés particulières dans ce domaine. Conséquemment, les enseignants de sciences sont moins bien outillés que leurs collègues en mathématiques ou en langues pour comprendre les raisons expliquant pourquoi certains de leurs élèves éprouvent plus de difficultés que d'autres. Il est souhaitable que dans les années à venir ces questions puissent être éclaircies au bénéfice des enseignants et de leurs élèves.

## CONCLUSION

L'apprentissage des sciences est réputé difficile et préoccupe plusieurs organisations internationales (Martin et al., 2016; OCDE, 2007, 2008, 2014). L'apprentissage conceptuel des sciences, c'est-à-dire la capacité de prédire, d'expliquer ou de décrire les phénomènes naturels de manière qualitative, demeure l'un des aspects de l'apprentissage des sciences le moins bien compris (Laugksch, 2000; NGSS Lead States, 2013; Roberts, 2007) et représente encore récemment l'un des thèmes de recherche les plus explorés en didactique des sciences (Lin, Lin, & Tsai, 2013). De nombreuses recherches ont montré que les conceptions spontanées qu'entretiennent les élèves à propos de différents phénomènes naturels peuvent constituer un obstacle important à l'apprentissage des concepts scientifiques étant souvent incompatibles avec les conceptions scientifiques enseignées dans les programmes scolaires. Ces conceptions spontanées sont d'autant plus préoccupantes, car elles s'avèrent persistantes et résistantes aux efforts pédagogiques des enseignants (Astolfi, Peterfalvi, & Vérin, 2006).

La persistance des conceptions spontanées a fait l'objet de plusieurs travaux en didactique des sciences. Certaines recherches ont attribué la persistance des conceptions spontanées à la difficulté d'acquérir les conceptions scientifiques. Selon cette perspective, les élèves adhèreraient de manière persistante aux conceptions spontanées, car ils éprouvent des difficultés à maîtriser les conceptions scientifiques. Ces recherches ont identifié certains aspects intrinsèques aux conceptions scientifiques qui les rendent difficiles à acquérir ou à apprendre. Ces travaux mettent donc surtout l'accent sur les différences épistémologiques entre conceptions spontanées et scientifiques. Certaines conceptions spontanées pourraient par exemple être

persistantes, car pour acquérir la conception scientifique il est nécessaire de changer d'ontologie (Chi, 1992). D'autres travaux ont porté davantage sur le problème de la mobilisation des conceptions une fois les conceptions scientifiques acquises. Dans ces écrits, la persistance des conceptions spontanées relève davantage d'une difficulté à faire coexister les conceptions et à mobiliser les conceptions appropriées. Les chercheurs inscrits dans cette perspective font généralement consensus à l'effet que les conceptions spontanées sont plus facilement accessibles que les conceptions scientifiques et qu'elles peuvent mener à des réponses scientifiquement inappropriées si les élèves ne parviennent pas à les contrôler. Les recherches suggèrent donc que, pour mobiliser les conceptions scientifiques, il faille avoir recours à un contrôle plus important des modes de pensée qui devrait s'observer empiriquement. Plusieurs études avancent que cette forme de raisonnement impliquerait le contrôle inhibiteur, c'est-à-dire le contrôle ou le blocage des réponses ou de stratégies de pensée spontanées.

Des études ont par exemple montré que des adultes ayant poursuivi une formation scientifique spécialisée (experts) activent davantage que des adultes sans formation scientifique spécialisée (novices) le contrôle inhibiteur pour mobiliser des conceptions scientifiques plutôt que spontanées (Brault Foisy et al., 2015; Masson et al., 2014). Toutefois, le fait que des élèves ayant pourtant profité d'une instruction scientifique comparable éprouvent à des degrés variables des difficultés conceptuelles demeure insuffisamment compris, notamment au regard de l'implication du contrôle inhibiteur. Peu de recherches se sont intéressées au lien entre les difficultés conceptuelles en sciences, c'est-à-dire la faible performance à des tâches de nature conceptuelle (p.ex. Conseil de la science et de la technologie, 2002), et le contrôle inhibiteur. L'objectif de cette recherche consistait donc à vérifier si les difficultés conceptuelles des élèves sont associées à une plus faible activation du contrôle inhibiteur. Il s'agissait plus concrètement de vérifier l'hypothèse selon laquelle les élèves ayant de la difficulté à mobiliser les conceptions scientifiques démontrent une sous-activation des régions

cérébrales associées au contrôle inhibiteur (CPVL, CPDL et CCA) par rapport aux élèves ayant plus de facilité.

Pour vérifier cette hypothèse, deux groupes de participants ont été comparés : un groupe de 12 élèves ayant des difficultés conceptuelles et un groupe de 12 élèves ayant plus de facilité. L'activité cérébrale des participants a été mesurée par IRMf alors qu'ils réalisaient une tâche cognitive où leur étaient présentés des énoncés concernant des concepts scientifiques abordés dans le programme de formation de l'école québécoise. Les participants, tous inscrits en 5<sup>e</sup> secondaire (16-17 ans) au cours de l'option sciences, devaient déterminer si les énoncés étaient scientifiquement corrects ou incorrects. La moitié des énoncés étaient congruents, c'est-à-dire qu'ils étaient compatibles avec les conceptions spontanées identifiées dans les recherches antérieures et reconnues comme répandues. L'autre moitié des énoncés étaient incongruents, c'est-à-dire incompatibles avec les conceptions spontanées et requéraient par conséquent de mobiliser la conception scientifique pour donner une réponse scientifiquement appropriée. Cette méthode a permis de comparer comment l'activité cérébrale des deux groupes diffère selon qu'ils répondent à des énoncés congruents ou incongruents.

Dans l'ensemble, alors que l'activité cérébrale dans les régions associées au contrôle inhibiteur était similaire entre les deux groupes lors de l'évaluation d'énoncés congruents, les élèves ayant de la facilité activaient davantage que les élèves ayant de la difficulté le CPDL et du CPVL gauches lors de l'évaluation d'énoncés incongruents. Ces différences laissent entendre que les élèves ayant de la facilité, comme les experts en sciences (Brault Foisy et al., 2015; Masson et al., 2014; Nelson et al., 2007), bloquent leurs conceptions spontanées pour être en mesure de fournir une réponse scientifiquement appropriée. Toutefois, cette transition d'une mobilisation plus automatique (énoncés congruents) vers une mobilisation plus contrôlée (énoncés incongruents) des conceptions ne s'observe pas de manière significative chez les élèves ayant des difficultés conceptuelles.

La principale conclusion de cette recherche est donc que, pour les élèves ayant des difficultés conceptuelles, il semble être plus difficile de contrôler l'activité dans les réseaux de neurones rattachés aux conceptions spontanées qui sont reconnus comme persistants, résistants et automatiquement activés. Les résultats appuient l'idée que certains élèves ont donc une moins grande capacité à réaliser un travail de comparaison des conceptions rattachées à des réseaux neuronaux en partie distincts (mémoire de travail), pour ensuite bloquer l'activation automatique du réseau neuronal rattaché à la conception spontanée (contrôle inhibiteur) et mobiliser une conception scientifique.

À la lumière des résultats de cette recherche et de recherches antérieures (p.ex. Brault Foisy et al., 2015; Dunbar et al., 2007; Masson et al., 2014; Nelson et al., 2007), le contrôle inhibiteur semble donc être une partie importante du processus d'apprentissage des concepts scientifiques. Des recherches en avaient déjà fait la démonstration en comparant des adultes ayant des niveaux de formation scientifique différents (Dunbar & Stein, 2007; Kelemen et al., 2012; Masson et al., 2014), toutefois, aucune recherche n'avait encore contribué à mieux comprendre l'implication du contrôle inhibiteur dans les mécanismes de mobilisation des conceptions chez des élèves en formation. Les résultats mènent donc plus directement à envisager des pistes de recherche portant sur des interventions que les enseignants peuvent considérer pour mieux aider les élèves ayant des difficultés conceptuelles en sciences. Il existe à l'heure actuelle des programmes d'intervention visant spécifiquement le développement du contrôle inhibiteur. Il semble en effet être possible d'améliorer les habiletés de résolution de problème des élèves en géométrie et en logique par des interventions visant l'activation du contrôle inhibiteur, notamment en demandant aux élèves d'identifier les pièges (Houdé et al., 2000) ou encore en les avertissant explicitement de l'existence de ceux-ci (Babai et al., 2015). Des interventions de ce genre pourraient être utilisées en complément aux approches qui visent l'apprentissage formel des concepts scientifiques. Dans des recherches ultérieures, il serait intéressant

de vérifier si l'application de certains de ces programmes contribue à une meilleure activation du contrôle inhibiteur chez les élèves ayant des difficultés conceptuelles en sciences.

Cette recherche encourage aussi, comme le propose notamment Houdé (2014), à revoir le statut des erreurs que commettent les élèves puisqu'il s'agit d'une piste qui en ouvre plusieurs autres. Les erreurs sont aussi sinon plus importantes que les réussites, elles nous démontrent que l'apprentissage est jalonné de biais et de décalages. Cette recherche a justement tenté de mieux comprendre pourquoi certains élèves commettent davantage d'erreurs ou tombent plus naturellement dans certains pièges conceptuels comme les conceptions spontanées en sciences. L'erreur est souvent vue d'un point de vue pédagogique comme un indice qu'une tâche ou un concept n'est pas maîtrisé. Or, les résultats de cette recherche mènent à penser que pour apprendre certains concepts scientifiques, un enseignement formel doit être accompagné de renforcement du contrôle inhibiteur. Comme il a été proposé précédemment, les élèves ayant des difficultés conceptuelles pourraient par exemple avoir besoin de *marqueurs contextuels* plus explicites ou plus nombreux pour activer le contrôle inhibiteur et arriver à mobiliser les conceptions scientifiques (Solomon, 1983) ou encore de l'usage de ces alertes pour développer leur capacité à mobiliser les conceptions (Potvin, 2013).

Envisager différemment les difficultés conceptuelles amène aussi à entrevoir sous un œil nouveau le « succès » des élèves ayant plus de facilité. Il semble que les élèves qui ont démontré une plus grande capacité à mobiliser les conceptions scientifiques ne doivent pas être perçus comme ayant « complété » un apprentissage. La persistance des conceptions spontanées et la nécessité d'activer le contrôle inhibiteur pour bloquer la mobilisation de ces conceptions mènent plutôt à penser que cet apprentissage n'est pas un état définitif, mais une vigilance à développer et entretenir. L'idée d'un enseignement visant à développer le contrôle inhibiteur représente donc un point de

départ intéressant qu'il serait pertinent d'approfondir dans le contexte de recherches visant les apprentissages en sciences, et ce, pour tous les élèves.

Enfin, la compréhension du lien entre le cerveau et l'apprentissage des sciences est encore aujourd'hui en émergence. Il n'est pas aussi développé que des domaines comme l'apprentissage la lecture ou des mathématiques, mais déjà, des résultats de recherche, dont ceux présentés dans cette thèse, permettent d'envisager des recherches plus appliquées visant à envisager des retombées pédagogiques. Bien que les résultats de cette recherche doivent être interprétés avec prudence, il paraît permis de penser que l'adoption d'une approche neuroscientifique à l'étude des difficultés conceptuelles ouvre la voie à des connaissances nouvelles qui pourront contribuer à aider les enseignants de sciences à faire des choix pédagogiques judicieux et éclairés.

## RÉFÉRENCES

- AAAS. (2017a). Item AM046006: During a hot day in the summer, the spaces between the concrete sections of a sidewalk get narrower because the concrete sections expand. Retrieved from <http://assessment.aaas.org/items/AM046006#/1>
- AAAS. (2017b). Item CE119002: The difference in size between young children and fully grown adults can be explained by the repetitive process of cell growth and division. Retrieved from <http://assessment.aaas.org/items/CE119002#/1>
- AAAS. (2017c). Item EG025001: In order to know which of two objects is moving faster, you need to know the weight (mass) of each object in addition to the motion energy. Retrieved from <http://assessment.aaas.org/items/EG025001#/1>
- AAAS. (2017d). Item EG064001: Both a piece of metal that feels hot and a piece of metal that feels cold have thermal energy.
- AAAS. (2017e). Item IE074002: Plants compete for water, space, and light when those resources are limited. Retrieved from <http://assessment.aaas.org/items/IE074002#/1>
- AAAS. (2017f). Item NG045002: Both a light bulb and an ice cream cone radiate energy because all objects radiate energy. Retrieved from <http://assessment.aaas.org/misconceptions/NGM032>
- Abimbola, I. O. (1988). A comment on the problem of terminology in the study of student conceptions in science. *Science Education*, 72(2), 175–184.
- Adler, R. J., & Taylor, J. E. (2007). Random fields and geometry. *Science*, 17(3), 448. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-48116-6>
- Ahr, E., Houdé, O., & Borst, G. (2016). Inhibition of the mirror generalization process in reading in school-aged children. *Journal of Experimental Child Psychology*, 145, 157–165. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2015.12.009>
- Amaro Jr, E., & Barker, G. J. (2006). Study design in fMRI: Basic principles. *Brain and Cognition*, 60(3), 220–232. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.bandc.2005.11.009>

- Arnaudin, M. W., & Mintzes, J. J. (1985). Students' alternative conceptions of the human circulatory system: A cross-age study. *Science Education*, 69(5), 721–733. <https://doi.org/10.1002/sce.3730690513>
- Aron, A. R., Robbins, T. W., & Poldrack, R. A. (2004). Inhibition and the right inferior frontal cortex. *Trends Cogn Sci*, 8(4), 170–177. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2004.02.010>
- Aron, A. R., Robbins, T. W., & Poldrack, R. A. (2014a). Inhibition and the right inferior frontal cortex: one decade on. *Trends Cogn Sci*, 18(4), 177–185. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.tics.2013.12.003>
- Aron, A. R., Robbins, T. W., & Poldrack, R. A. (2014b). Right inferior frontal cortex: addressing the rebuttals. *Frontiers in Human Neuroscience*, 8. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2014.00905>
- Ashburner, J., Barnes, G., Chen, C., Daunizeau, J., Moran, R., Henson, R., ... Phillips, C. (2013). SPM8 Manual The FIL Methods Group ( and honorary members ). *Functional Imaging Laboratory*, 475. <https://doi.org/10.1111/j.1365-294X.2006.02813.x>
- Ashburner, J., & Friston, K. J. (2005). Unified segmentation. *NeuroImage*, 26(3), 839–851. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2005.02.018>
- Aso, T., Nishimura, K., Kiyonaka, T., Aoki, T., Inagawa, M., Matsushashi, M., ... Fukuyama, H. (2016). Dynamic interactions of the cortical networks during thought suppression. *Brain and Behavior*, 6(8).
- Astolfi, J.-P., Peterfalvi, B., & Vérin, A. (2006). *Comment les enfants apprennent les sciences*. Paris: Retz.
- Astolfi, J. P., & Develay, M. (2002). *La didactique des sciences*. Paris: Que sais-je? Presses universitaires de France.
- Athanasiou, K., & Mavrikaki, E. (2013). Conceptual Inventory of Natural Selection as a Tool for Measuring Greek University Students' Evolution Knowledge: Differences between novice and advanced students. *International Journal of Science Education*, 1–24. <https://doi.org/10.1080/09500693.2013.856529>
- Babai, R., Eidelman, R. R., & Stavy, R. (2012). Preactivation of Inhibitory Control Mechanisms Hinders Intuitive Reasoning. *International Journal of Science and Mathematics Education*, 10(4), 763–775. <https://doi.org/10.1007/s10763-011-9287-y>

- Babai, R., & Levit-Dori, T. (2009). Several CASE lessons can improve students' control of variables reasoning scheme ability. *Journal of Science Education and Technology*, *18*(5), 439–446. <https://doi.org/10.1007/s10956-009-9161-7>
- Babai, R., Sekal, R., & Stavy, R. (2010). Persistence of the intuitive conception of living things in adolescence. *Journal of Science Education and Technology*, *19*(1), 20–26. <https://doi.org/10.1007/s10956-009-9174-2>
- Babai, R., Shalev, E., & Stavy, R. (2015). A warning intervention improves students' ability to overcome intuitive interference. *ZDM - Mathematics Education*, *47*(5), 735–745. <https://doi.org/10.1007/s11858-015-0670-y>
- Babai, R., Zilber, H., Stavy, R., & 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. <https://doi.org/10.1007/s10763-009-9169-8>
- Bachelard, G. (1934). *La formation de l'esprit scientifique*. Paris: Virin.
- Bachelard, G. (1940). *La philosophie du non: essai d'une philosophie du nouvel esprit scientifique*. Paris: Presses universitaires de France. Retrieved from <http://books.google.ca/books?id=DvvQGQAACAAJ>
- Badre, D., & Wagner, A. D. (2007). Left ventrolateral prefrontal cortex and the cognitive control of memory. *Neuropsychologia*, *45*(13), 2883–2901. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2007.06.015>
- Bago, B., & De Neys, W. (2017). Fast logic?: Examining the time course assumption of dual process theory. *Cognition*, *158*, 90–109. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2016.10.014>
- Bakeman, R. (2005). Recommended effect size statistics for repeated measures designs. *Behavior Research Methods*, *37*(3), 379–384. <https://doi.org/10.3758/BF03192707>
- Bandettini, P. a, & Ungerleider, L. G. (2001). From neuron to BOLD: new connections. *Nature Neuroscience*, *4*(9), 864–866. <https://doi.org/10.1038/nn0901-864>
- Banet, E., & Ayuso, E. (2000). Teaching genetics at secondary school: A strategy for teaching about the location of inheritance information. *Science Education*, *84*(3), 313. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1098-237X\(200005\)84:3<313::AID-SCE2>3.3.CO;2-E](https://doi.org/10.1002/(SICI)1098-237X(200005)84:3<313::AID-SCE2>3.3.CO;2-E)

- Barbey, A. K., Koenigs, N., & Grafman, J. (2013). Dorsolateral Prefrontal Contributions to Human Working Memory. *Cortex*, *49*(5), 1195–1205. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2012.05.022.Dorsolateral>
- Baxter, J. (1989). Children's understanding of familiar astronomical events. *International Journal of Science Education*, *11*(5), 502–513. <https://doi.org/10.1080/0950069890110503>
- Bélanger, M. (2008). *Du changement conceptuel à la complexification conceptuelle dans l'apprentissage des sciences* (Vol. Ph.D.). Unpublished doctoral dissertation, Université de Montréal, Canada.
- Berger, H., & Gloor, P. (1969). Hans Berger on the electroencephalogram of man. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology, Supplement No. 28*. [https://doi.org/10.1016/0013-4694\(69\)91207-3](https://doi.org/10.1016/0013-4694(69)91207-3)
- Besner, D., & Coltheart, M. (1979). Ideographic and alphabetic processing in skilled reading of English. *Neuropsychologia*, *17*(5), 467–472. [https://doi.org/10.1016/0028-3932\(79\)90053-8](https://doi.org/10.1016/0028-3932(79)90053-8)
- Birn, R. M., Cox, R. W., & Bandettini, P. A. (2002). Detection versus Estimation in Event-Related fMRI: Choosing the Optimal Stimulus Timing. *NeuroImage*, *15*, 252–264. <https://doi.org/10.1006/nimg.2001.0964>
- Bjorklund, D. F., & Harnishfeger, K. K. (1995). The evolution of inhibition mechanisms and their role in human cognition and behavior. In *Interference and Inhibition in Cognition* (pp. 141–173). <https://doi.org/10.1016/B978-012208930-5/50006-4>
- Blumenfeld, R. S., Parks, C. M., Yonelinas, A. P., & 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. <https://doi.org/10.1162/jocn.2010.21459>
- Blumenfeld, R. S., & Ranganath, C. (2006). Dorsolateral prefrontal cortex promotes long-term memory formation through its role in working memory organization. *The Journal of Neuroscience : The Official Journal of the Society for Neuroscience*, *26*(3), 916–25. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.2353-05.2006>
- Borst, G., Cachia, A., Vidal, J., Simon, G., Fischer, C., Pineau, A., ... Houdé, O. (2014). Folding of the anterior cingulate cortex partially explains inhibitory control during childhood: A longitudinal study. *Developmental Cognitive Neuroscience*, *9*, 126–135. <https://doi.org/10.1016/j.dcn.2014.02.006>

- Borst, G., Poirel, N., Pineau, A., Cassotti, M., & Houdé, O. (2013). Inhibitory control efficiency in a Piaget-like class-inclusion task in school-age children and Borst, G., Poirel, N., Pineau, A., Cassotti, M., & Houdé, O. (2013). Inhibitory control efficiency in a Piaget-like class-inclusion task in school-age children . *Developmental Psychology*, *49*(7), 1366–74. <https://doi.org/10.1037/a0029622>
- Botvinick, M. M. (2007). Conflict monitoring and decision making: reconciling two perspectives on anterior cingulate function. *Cognitive, Affective & Behavioral Neuroscience*, *7*(4), 356–366. <https://doi.org/10.3758/CABN.7.4.356>
- Brault Foisy, L.-M., Ahr, E., Masson, S., Houdé, O., & Borst, G. (2017a). Is inhibitory control involved in discriminating pseudowords that contain the reversible letters b and d ? *Journal of Experimental Child Psychology*, *162*, 259–267. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2017.05.011>
- Brault Foisy, L.-M., Ahr, E., Masson, S., Houdé, O., & Borst, G. (2017b). Is inhibitory control involved in discriminating pseudowords that contain the reversible letters b and d ? *Journal of Experimental Child Psychology*, *162*, 259–267. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2017.05.011>
- Brault Foisy, L.-M., Potvin, P., Riopel, M., & Masson, S. (2015). Is inhibition involved in overcoming a common physics misconception in mechanics? *Trends in Neuroscience and Education*, *4*(1), 26–36.
- Braund, M. (1998). Trends in children's concepts of vertebrate and invertebrate. *Journal of Biological Education*, *32*(2), 112–118. <https://doi.org/10.1080/00219266.1998.9655606>
- Brody, M. (1992). Student science knowledge related to ecological crises. In *AERA, American Educational Research Association*. San Francisco.
- Brody, M. J. (1994). Student science knowledge related to ecological crises. *International Journal of Science Education*, *16*(4), 421–435. <https://doi.org/10.1080/0950069940160404>
- Broughton, S. H., Sinatra, G. M., & Nussbaum, E. M. (2013). “Pluto Has Been a Planet My Whole Life!” Emotions, Attitudes, and Conceptual Change in Elementary Students' Learning about Pluto's Reclassification. *Research in Science Education*, *43*(2), 529–550. <https://doi.org/10.1007/s11165-011-9274-x>
- Buckner, R. L., Andrews-Hanna, J. R., & Schacter, D. L. (2008). The brain's default network: Anatomy, function, and relevance to disease. *Annals of the New York Academy of Sciences*. <https://doi.org/10.1196/annals.1440.011>

- Bush, G., Whalen, P. J., Rosen, B. R., Jenike, M. A., McInerney, S. C., & 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. Retrieved from [http://dx.doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0193\(1998\)6:4%3C270::AID-HBM6%3E3.0.CO;2-0](http://dx.doi.org/10.1002/(SICI)1097-0193(1998)6:4%3C270::AID-HBM6%3E3.0.CO;2-0)
- Bush, G., Whalen, P. J., Shin, L. M., & Rauch, S. L. (2006). The counting Stroop: a cognitive interference task. *Nature Protocols*, 1(1), 230–233. <https://doi.org/10.1038/nprot.2006.35>
- Buxton, R. B., Uludağ, K., Dubowitz, D. J., & Liu, T. T. (2004). Modeling the hemodynamic response to brain activation. *NeuroImage*, 23(SUPPL. 1), 220–233. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2004.07.013>
- Bybee, R. W., & DeBoer, G. E. (1994). Research on goals for the science curriculum. In D. L. Gabel (Ed.), *Handbook of research on science teaching and learning* (pp. 357–387). New York: MacMillan.
- Caballero, A., Granberg, R., & Tseng, K. Y. (2016). Mechanisms contributing to prefrontal cortex maturation during adolescence. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2016.05.013>
- Cachia, A., Borst, G., Vidal, J., Fischer, C., Pineau, A., Mangin, J.-F., & Houdé, O. (2014). The shape of the ACC contributes to cognitive control efficiency in preschoolers. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 26(1), 96–106.
- Cahill, L. (2006). Why sex matters for neuroscience. *Nature Reviews Neuroscience*, 7(6), 477–484.
- Cai, Q., Van der Haegen, L., & Brysbaert, M. (2013). Complementary hemispheric specialization for language production and visuospatial attention. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110(4), E322–E330.
- Carey, S. (2000). Science Education as Conceptual Change. *Journal of Applied Developmental Psychology*, 21(1), 13–19. [https://doi.org/10.1016/S0193-3973\(99\)00046-5](https://doi.org/10.1016/S0193-3973(99)00046-5)
- Chambers, C. D., Garavan, H., & Bellgrove, M. A. (2009). Insights into the neural basis of response inhibition from cognitive and clinical neuroscience. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 33(5), 631–646. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2008.08.016>

- Chen, C. Y., Muggleton, N. G., Tzeng, O. J. L., Hung, D. L., & Juan, C. H. (2009). Control of prepotent responses by the superior medial frontal cortex. *NeuroImage*, *44*(2), 537–545. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2008.09.005>
- Chi, M. T. H. (1992). Conceptual change within an across ontological categories: Examples from learning and discovery in science. In R. Giere (Ed.), *Cognitive models of science* (Minnesota, pp. 129–186). Minneapolis: University of Minnesota Press.
- Chi, M. T. H., & Slotta, J. D. (1993). The ontological coherence of intuitive physics. *Cognition and Instruction*, *10*(2–3), 249–260.
- Chiappetta, E. L. (1976). A review of piagetian studies relevant to science instruction at the secondary and college level. *Science Education*, *60*(2), 253–261. <https://doi.org/10.1002/sce.3730600215>
- Chiu, M.-H., Chou, C.-C., & Liu, C.-J. (2002). Dynamic processes of conceptual change: Analysis of constructing mental models of chemical equilibrium. *Journal of Research in Science Teaching*, *39*(8), 688–712. <https://doi.org/10.1002/tea.10041>
- Cohen, D. (1972). Magnetoencephalography: detection of the brain's electrical activity with a superconducting magnetometer. *Science*, *175*(4022), 664–666.
- Cohen, J. (1988). Statistical power analysis for the behavioral sciences. *Statistical Power Analysis for the Behavioral Sciences*. <https://doi.org/10.1234/12345678>
- Comité de gestion de la taxe scolaire de l'île de Montréal. (2013). Guide d'accompagnement du la carte de la défavorisation des familles avec enfants de moins de 18 ans de l'île de Montréal.
- Confrey, J. (1990). A review of the research on student conceptions in mathematics, science, and programming. In C. B. Cazden (Ed.), *Review of Research in Education* (Vol. 16, pp. 3–56). Washington, NW: American Educational Research Association.
- Conseil de la science et de la technologie. (2002). La culture scientifique et technique au Québec: Bilan. Gouvernement du Québec.
- Conseil des académies canadiennes. (2014). Culture scientifique : qu'en est-il au Canada? (G. du Canada, Ed.). Ottawa.

- Cordova, J. R., Sinatra, G. M., Broughton, S. H., & Taasobshirazi, G. (2011). Self-efficacy, confidence in prior knowledge, and conceptual change. In *American Educational Research Association*. New Orleans, LA.
- Cornu, B. (1983). *Apprentissage de la notion de limite: conceptions et obstacles*. Université de Grenoble.
- Coştu, B., Ayas, A., & Niaz, M. (2010). Promoting conceptual change in first year students' understanding of evaporation. *Chemistry Education Research and Practice*, 11(1), 5. <https://doi.org/10.1039/c001041n>
- D'Angiulli, A., Van Roon, P. M., Weinberg, J., Oberlander, T. F., Grunau, R. E., Hertzman, C., & Maggi, S. (2012). Frontal EEG/ERP correlates of attentional processes, cortisol and motivational states in adolescents from lower and higher socioeconomic status. *Frontiers in Human Neuroscience*, 6(November), 306. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2012.00306>
- De Bie, H. M. A., Boersma, M., Wattjes, M. P., Adriaanse, S., Vermeulen, R. J., Oostrom, K. J., ... Delemarre-Van De Waal, H. A. (2010). Preparing children with a mock scanner training protocol results in high quality structural and functional MRI scans. *European Journal of Pediatrics*, 169(9), 1079–1085. <https://doi.org/10.1007/s00431-010-1181-z>
- De Neys, W. (2006). Automatic-heuristic and executive-analytic processing during reasoning: Chronometric and dual-task considerations. *Quarterly Journal of Experimental Psychology (2006)*, 59(6), 1070–1100. <https://doi.org/10.1080/02724980543000123>
- de Neys, W., Cromheeke, S., & Osman, M. (2011). Biased but in doubt: Conflict and decision confidence. *PLoS ONE*, 6(1). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0015954>
- De Neys, W., & Goel, V. (2011). Heuristics and biases in the brain: Dual neural pathways for decision making. In O. Vartanian & D. R. Mandel (Eds.), *Neuroscience of Decision Making* (pp. 125–142). New York: Psychology Press.
- De Neys, W., Vartanian, O., & Goel, V. (2008). Smarter than we think: when our brains detect that we are biased. *Psychological Science*, 19(5), 483–489. <https://doi.org/10.1111/j.1467-9280.2008.02113.x>
- Dempster, F., & Corkill, A. (1999). Interference and Inhibition in Cognition and Behavior: Unifying Themes for Educational Psychology. *Educational Psychology Review*, 11(1), 1–88. <https://doi.org/10.1023/A:1021992632168>

- Dempster, F. N. (1992). The rise and fall of the inhibitory mechanism: Toward a unified theory of cognitive development and aging. *Developmental Review, 12*(1), 45–75. [https://doi.org/10.1016/0273-2297\(92\)90003-K](https://doi.org/10.1016/0273-2297(92)90003-K)
- Désautels, J., Larochelle, M., & Gagné, B. (1993). La formation à l'enseignement des sciences : Le virage épistémologique. *Didaskalia, 1*, 49–67.
- Desmond, J. E., & Glover, G. H. (2002). Estimating sample size in functional MRI (fMRI) neuroimaging studies: Statistical power analyses. *Journal of Neuroscience Methods, 118*(2), 115–128. Retrieved from <http://www.sciencedirect.com/science/article/B6T04-460DN2T-3/2/ff8babb69ca1dff1bba3fab2487656bf>
- Diamond, A. (2013). Executive functions. *Annual Review of Psychology, 64*, 135–68. <https://doi.org/10.1146/annurev-psych-113011-143750>
- diSessa, A. A. (1982). Unlearning Aristotelian physics: A study of knowledge-based learning. *Cognitive Science, 6*(1), 37–75.
- diSessa, A. A. (1993). Toward an Epistemology of Physics. *Cognition and Instruction, 10*(2/3), 105–225. Retrieved from <http://www.jstor.org/stable/3233725>
- diSessa, A. A. (2006). A history of conceptual change research: Threads and fault lines. In R. K. Sawyer (Ed.), *Cambridge Handbook of the Learning Sciences* (pp. 265–281). Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- diSessa, A. A. (2008). A bird's-eye view of the “pieces” vs. “coherence” controversy (from the “pieces” side of the fence). In S. Vosniadou (Ed.), *International handbook of Research on Conceptual Change*. New York: Routledge.
- Dreyfus, A., & Jungwirth, E. (1989). The pupil and the living cell: a taxonomy of dysfunctional ideas about an abstract idea. *Journal of Biological Education, 23*(1), 49–55.
- Driver, R. (1989). Students' conceptions and the learning of science. *International Journal of Science Education, 11*(5), 481–490. <https://doi.org/10.1080/0950069890110501>
- Driver, R., & Easley, J. (1978). Pupils and Paradigms: a Review of Literature Related to Concept Development in Adolescent Science Students. *Studies in Science Education, 5*(1), 61–84. <https://doi.org/10.1080/03057267808559857>

- Driver, R., Squires, A., Rushworth, P., & Wood-Robinson, V. (2015). *Making Sense of Secondary Science: Research into children's ideas*. Milton Park, Abingdon, Oxon: Routledge.
- Duit, R. (1991). On the role of analogies and metaphors in learning science. *Science Education*, 75(6), 649–672. <https://doi.org/10.1002/sce.3730750606>
- Duit, R. (2007). Science education research internationally: Conceptions, research methods, domains of research. *Eurasia Journal of Mathematics, Science & Technology Education*, 3(1), 3–15.
- Dunbar, K. N., Fugelsang, J. A., & Stein, C. (2007). Do naïve theories ever go away? Using brain and behavior to understand changes in concepts. In M. Evans, C. Lovett, & P. Shah (Eds.), *Thinking with Data : 33rd Carnegie Symposium on Cognition* (pp. 193–206). Mahwah, NJ: Erlbaum.
- Dunbar, K. N., & Stein, C. (2007). Do Naïve Theories Ever Go Away? Using Brain and Behavior to Understand Changes in Concepts. In M. Lovett & P. Shah (Eds.), *Thinking with data* (pp. 193–206). New York: Lawrence Erlbaum.
- Dunlop, J. (2000). How children observe the universe. *Publications of the Astronomical Society of Australia*, 17(2), 194. <https://doi.org/10.1071/AS00194>
- 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. <https://doi.org/10.1007/s10956-010-9216-9>
- Einsen, Y., & Stavy, R. (1988). Students' understanding of photosynthesis. The American Biology Teacher, 50(4), pp. 208-212. *The American Biology Teacher*, 50(4), 208–212.
- Elliott, R. (2003). Executive functions and their disorders. *British Medical Bulletin*. <https://doi.org/10.1093/bmb/65.1.49>
- Engelhardt, P. E., Nigg, J. T., Carr, L. A., & Ferreira, F. (2008). Cognitive Inhibition and Working Memory in Attention-Deficit/Hyperactivity Disorder, 117(3), 591–605. <https://doi.org/10.1001/jamasurg.2014.1086.Feasibility>
- Eshach, H., & Schwartz, J. L. (2006). Sound Stuff? Naïve materialism in middle-school students' conceptions of sound. *International Journal of Science Education*, 28(7), 733–764. <https://doi.org/10.1080/09500690500277938>

- Eustache, F., Faure, S., & Desgranges, B. (2013). *Manuel de neuropsychologie* (Dunod). Paris.
- Evans, J. S. B. T. (2010). *Thinking twice: two minds in one brain*. Oxford: Oxford University Press.
- Evans, J. S. B. T., & Curtis-Holmes, J. (2005). Rapid responding increases belief bias: Evidence for the dual-process theory of reasoning. *Thinking & Reasoning*, *11*(4), 382–389. <https://doi.org/10.1080/13546780542000005>
- Faillenot, I. (2014). Faire parler les images IRM : protocoles, prétraitements et statistiques. *Douleur et Analgésie*, *27*(1), 4–12. <https://doi.org/10.1007/s11724-014-0372-1>
- Fedi, L. (2017). La psychologie de l'esprit scientifique chez Bachelard et ses prédécesseurs. In A. Colin (Ed.), *Revue d'histoire des sciences*. CAIRN.
- Fink, A., Grabner, R. H., Benedek, M., Reishofer, G., Hauswirth, V., Fally, M., ... Neubauer, A. C. (2009). The creative brain: Investigation of brain activity during creative problem solving by means of EEG and fMRI. *Human Brain Mapping*, *30*(3), 734–748. <https://doi.org/10.1002/hbm.20538>
- Flament, C., & Rouquette, M. L. (2003). *Anatomie des idées ordinaires, comment étudier les représentations sociales*. Paris: A. Colin.
- Fransson, P., & Marrelec, G. (2008). The precuneus/posterior cingulate cortex plays a pivotal role in the default mode network: Evidence from a partial correlation network analysis. *NeuroImage*, *42*(3), 1178–1184. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2008.05.059>
- Friedman, N. P., & Miyake, A. (2017). Unity and diversity of executive functions: Individual differences as a window on cognitive structure. *Cortex*, *86*, 186–204. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2016.04.023>
- Friedman, N. P., Miyake, A., Young, S. E., Defries, J. C., Corley, R. P., & Hewitt, J. K. (2008). Individual Differences in Executive Functions Are Almost Entirely Genetic in Origin. *Journal of Experimental Psychology*, *137*(2), 201–225. <https://doi.org/10.1037/0096-3445.137.2.201>
- Friston, K. J., Williams, S., Howard, R., Frackowiak, R. S. J., & Turner, R. (1996). Movement-related effects in fMRI time-series. *Magnetic Resonance in Medicine*, *35*(3), 346–355. <https://doi.org/10.1002/mrm.1910350312>

- Fritsch, G., & Hitzig, E. (2009). Electric excitability of the cerebrum. *Epilepsy and Behavior*, *15*(2), 123–130. <https://doi.org/10.1016/j.yebeh.2009.03.001>
- Fugelsang, J. A., & Dunbar, K. N. (2005). Brain-based mechanisms underlying complex causal thinking. *Neuropsychologia*, *43*(8), 1204–1213. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2004.10.012>
- Funahashi, S. (2001). Neuronal mechanisms of executive control by the prefrontal cortex. *Neuroscience Research*, *39*(2), 147–165. [https://doi.org/10.1016/S0168-0102\(00\)00224-8](https://doi.org/10.1016/S0168-0102(00)00224-8)
- Functional Imaging Laboratory. (2017). Statistical Parametric mapping. Retrieved from <http://www.fil.ion.ucl.ac.uk/spm/>
- Gabel, D. L., Sherwood, R. D., & Enochs, L. (1984). Problem-solving skills of high school chemistry students. *Journal of Research in Science Teaching*, *21*(2), 221–233. <https://doi.org/10.1002/tea.3660210212>
- Gallegos, L., Jerezano, M. E., & Flores, F. (1994). Preconceptions and relations used by children in the construction of food chains. *Journal of Research in Science Teaching*, *31*(3), 259–272. <https://doi.org/10.1002/tea.3660310306>
- Garavan, H. (2002). Dissociable executive functions in the dynamic control of behavior: Inhibition, error detection, and correction. *NeuroImage*, *17*(4), 1820–1829. <https://doi.org/10.1006/nimg.2002.1326>
- Garnett, P. J., & Treagust, D. F. (1992). Conceptual difficulties experienced by senior high school students of electrochemistry: Electric circuits and oxidation???reduction equations. *Journal of Research in Science Teaching*, *29*(2), 121–142. <https://doi.org/10.1002/tea.3660290204>
- Gayford, C. G. (1986). Some aspects of the problems of teaching about energy in school biology. *European Journal of Science Education*, *8*(4), 443–450. <https://doi.org/10.1080/0140528860080410>
- Genovese, C. R., Lazar, N. A., & Nichols, T. (2002). Thresholding of statistical maps in functional neuroimaging using the false discovery rate. *Neuroimage*, *15*(4), 870–878. <https://doi.org/10.1006/nimg.2001.1037>
- Gigerenzer, G., & Goldstein, D. G. (1996). Reasoning the Fast and Frugal Way : Models of Bounded Rationality, *103*(4), 650–669. <https://doi.org/10.1093/acprof>
- Gignac, G. E., & Szodorai, E. T. (2016). Effect size guidelines for individual differences researchers. *Personality and Individual Differences*, *102*, 74–78.

- Giordan, A., & de Vecchi, G. (1987). *Les origines du savoir : des conceptions des apprenants aux concepts scientifiques*. Delachaux et Niestlé.
- Godin, B., Gingras, Y., & Bourneuf, É. (1997). *Les indicateurs de culture scientifique et technique*.
- Gonen, S. (2008). A study on student teachers' Misconceptions and scientifically acceptable conceptions about mass and gravity. *Journal of Science Education and Technology*, 17(1), 70–81. <https://doi.org/10.1007/s10956-007-9083-1>
- Gouvernement du Québec. (2006a). *Programme de formation de l'école québécoise*. Québec.
- Gouvernement du Québec. (2006b). *Programme de formation de l'école québécoise - Éducation préscolaire Enseignement primaire*. Québec.
- Gouvernement du Québec. (2006c). *Programme de formation de l'école québécoise - Enseignement secondaire premier cycle*. Québec.
- Gouvernement du Québec. (2007a). *Programme de formation de l'école québécoise, deuxième cycle science et technologie de l'environnement*. Québec. Retrieved from <http://www1.education.gouv.qc.ca/sections/programmeFormation/secondaire2/medias/07-00846.pdf>
- Gouvernement du Québec. (2007b). *Programme de formation de l'école québécoise, deuxième cycle science et technologie de l'environnement*. Québec.
- Gouvernement du Québec. (2007c). *Programme de formation de l'école québécoise Enseignement secondaire, deuxième cycle*. Québec.
- Gouvernement du Québec. (2007d). *Programme de formation de l'école québécoise Enseignement secondaire, Physique*. Québec.
- Gouvernement du Québec. (2012). Office québécois de la langue française. Retrieved May 2, 2017, from <http://www.granddictionnaire.com/>
- Grabner, R. H., Ansari, D., Koschutnig, K., Reishofer, G., Ebner, F., & Neuper, C. (2009). To retrieve or to calculate? Left angular gyrus mediates the retrieval of arithmetic facts during problem solving. *Neuropsychologia*, 47(2), 604–608. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2008.10.013>

- Grabner, R. H., Ansari, D., Reishofer, G., Stern, E., Ebner, F., & Neuper, C. (2007). Individual differences in mathematical competence predict parietal brain activation during mental calculation. *NeuroImage*, *38*(2), 346–356. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2007.07.041>
- Grant, D., & 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.
- Gunstone, R. F., & White, R. T. (1981). Understanding of gravity. *Science Education*, *65*(3), 291–299. <https://doi.org/10.1002/sce.3730650308>
- Gunstone, R., & Watts, M. (1985). Force and Motion. In R. Driver, E. Guesne, & A. Tiberghien (Eds.), *Children's Ideas in Science* (pp. 91–95). Milton Keynes: Open University Press.
- Guzetti, B. J., Snyder, T. E., Glass, G. V., & Gamas, W. S. (1993). Meta-analysis of instructional interventions from reading education and science education to promote conceptual change in science. *Reading Research Quarterly*, *28*(2), 116–161.
- Halloun, I. A., & Hestenes, D. (1985). Common sense concepts about motion. *American Journal of Physics*, *53*(11), 1056–1065.
- Harris, P. L. (2009). Piaget on causality: The Whig interpretation of cognitive development. *British Journal of Psychology (London, England : 1953)*, *100*(Pt 1A), 229–232. <https://doi.org/10.1348/000712609X414222>
- Hebb, D. O. (1949). The Organization of Behavior. *The Organization of Behavior*, *911*(1), 335. <https://doi.org/10.2307/1418888>
- Heddy, B. C., & Sinatra, G. M. (2013). Transforming Misconceptions: Using Transformative Experience to Promote Positive Affect and Conceptual Change in Students Learning About Biological Evolution. *Science Education*, *97*(5), 723–744. <https://doi.org/10.1002/sce.21072>
- Heeger, D. J., & Ress, D. (2002). What Does fMRI Tell Us About Neuronal Activity? *Nature Reviews Neuroscience*, *3*(February), 142–151. <https://doi.org/10.1038/nrn730>

- Heekeren, H. R., Marrett, S., Ruff, D. A., Bandettini, P. A., & 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 of the United States of America*, *103*(26), 10023–8. <https://doi.org/10.1073/pnas.0603949103>
- Herrmann-Abell, C. F., & DeBoer, G. E. (2007). Probing Middle School Students' Knowledge of Thermal Expansion and Contraction through Content-Aligned Assessment. *National Association for Research in Science Teaching (NARST) Annual Conference*, 15–18. Retrieved from [https://project2061.aaas.org/publications/2061Connections/2008/media/NARST Atoms and Molecules 2008-3-11-08.pdf](https://project2061.aaas.org/publications/2061Connections/2008/media/NARST%20Atoms%20and%20Molecules%202008-3-11-08.pdf)  
[http://198.151.217.222/publications/2061Connections/2007/media/thermal\\_expansion\\_and\\_contraction.pdf](http://198.151.217.222/publications/2061Connections/2007/media/thermal_expansion_and_contraction.pdf)
- Hestenes, D., Wells, M., & Swackhamer, G. (1992). Force concept inventory. *The Physics Teacher*, *30*(3), 141. <https://doi.org/10.1119/1.2343497>
- Hewson, M. G. A. B. (1986). The acquisition of scientific knowledge: Analysis and representation of student conceptions concerning density. *Science Education*, *70*(2), 159–170. <https://doi.org/10.1002/sce.3730700210>
- Hickey, R., & Schibeci, R. A. (1999). The attraction of magnetism. *Physics Education*, *34*(6), 383–388. <https://doi.org/10.1126/science.294.5546.1483>
- Hoaglin, D. C., Iglewicz, B., & Tukey, J. W. (1986). Performance of Some Resistant Performance Rules for Labeling Outlier. *Journal of the American Statistical Association*, *81*(396), 991–999. <https://doi.org/10.1080/01621459.1986.10478363>
- Hofer, B. K., & Pintrich, P. R. (1997). The Development of Epistemological Theories: Beliefs About Knowledge and Knowing and Their Relation to Learning. *Review of Educational Research*, *67*(1). <https://doi.org/10.3102/00346543067001088>
- Holding, B. (1987). *Investigation of schoolchildren's understanding of the process of dissolving with special reference to the conservation of mass and the development of atomistic ideas*. University of Leeds.
- Houdé, O. (2004). *La psychologie de l'enfant* (Presses un). Paris.
- Houdé, O. (2013). *La psychologie de l'enfant. Que sais-je? [reprise du QSJ? de Jean Piaget et Bärbel Inhelder, 1966]* (6e ed.). Paris: Presses Universitaires de France.

- Houdé, O. (2014). *Apprendre à résister* (Le Pommier). Paris.
- Houdé, O., & Borst, G. (2014). Measuring inhibitory control in children and adults: Brain imaging and mental chronometry. *Frontiers in Psychology*, 5(JUN), 1–7. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2014.00616>
- Houdé, O., & Borst, G. (2015). Evidence for an inhibitory-control theory of the reasoning brain. *Frontiers in Human Neuroscience*, 9. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2015.00148>
- Houdé, O., & Leroux, G. (2012). *Psychologie du développement cognitif. Licence: Manuel* (2e ed.). Paris: Presses universitaires de France.
- Houdé, O., Zago, L., Mellet, E., Moutier, S., Pineau, A., Mazoyer, B., & 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., & McCarthy, G. (2004). *Functional magnetic resonance imaging. Magnetic Resonance Imaging*.
- Huettel, S. A., Song, A. W., & McCarthy, G. (2008). *Functional Magnetic Resonance Imaging* (2nd editio). Sunderland, MA: Sinauer Associates Inc.
- Hull, C. L. (1943). Principles of Behavior: An Introduction to Behavior Theory. *The Journal of Abnormal and Social Psychology*, 39(3), 377–380. <https://doi.org/10.1037/h0051597>
- IBM Corp. (2016). IBM SPSS Statistics for Windows, Version 24. Armonk, NY: IBM Corp.
- Jodelet, D. (2003). *Les représentations sociales*. Paris: Presses universitaires de France.
- 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. <https://doi.org/10.1080/0950069980200607>
- 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. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2729.1991.tb00230.x>

- Jordan, V., & Brownlee, L. (1981). Meta-analysis of the relationship between Piagetian and school achievement tests. In *Annual Meeting of the American Educational Research Association*. Los Angeles, CA.
- Jungwirth, E. (1975). Preconceived Adaptation and Inverted Evolution. *Australian Science Teachers Journal*, 21(2), 95–100.
- Kandel, L., & Moles, A. (1958). Application de l'indice de Flesch à la langue française. *Cahiers Études de Radio-Télévision*, 19, 253–274.
- Kelemen, D., & Rosset, E. (2009). The human function compunction: teleological explanation in adults. *Cognition*, 111(1), 138–143.  
<https://doi.org/10.1016/j.cognition.2009.01.001>
- Kelemen, D., Rottman, J., & Seston, R. (2012). Professional Physical Scientists Display Tenacious Teleological Tendencies: Purpose-Based Reasoning as a Cognitive Default. *Journal of Experimental Psychology: General*, No Pagination Specified. <https://doi.org/10.1037/a0030399>
- Kesidou, S., & Duit, R. (1993). Students' conceptions of the second law of thermodynamics—an interpretive study. *Journal of Research in Science Teaching*, 30(1), 85–106. <https://doi.org/10.1002/tea.3660300107>
- Kubiátko, M., & Prokop, P. (2007). Pupils' misconceptions about mammals. *Journal of Baltic Science Education*, 6(1), 5–15.
- Kuhn, T. S. (1962). *The Structure of Scientific Revolutions*. Structure (Vol. 2). <https://doi.org/10.1046/j.1440-1614.2002.t01-5-01102a.x>
- Kwon, Y.-J., & 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. Retrieved from [http://dx.doi.org/10.1002/\(SICI\)1098-2736\(200001\)37:1%3C44::AID-TEA4%3E3.0.CO;2-J](http://dx.doi.org/10.1002/(SICI)1098-2736(200001)37:1%3C44::AID-TEA4%3E3.0.CO;2-J)
- Lakatos, I. (1970). Falsification and the methodology of scientific research programmes. In I. Lakatos & A. Musgrave (Eds.), *Criticism and the growth of knowledge* (Cambridge, pp. 91–196). Cambridge.
- Lanoë, C., Vidal, J., Lubin, A., Houdé, O., & Borst, G. (2016). Inhibitory control is needed to overcome written verb inflection errors: Evidence from a developmental negative priming study. *Cognitive Development*, 37, 18–27. <https://doi.org/10.1016/j.cogdev.2015.10.005>

- Larochelle, M., & Désautels, J. (1992). *Autour de l'idée de science*. Québec: Presses de l'Université Laval.
- Laugksch, R. C. (2000). Scientific Literacy: A Conceptual Overview. *Science Education*, 84(1), 71–94.
- Leach, J., Driver, R., Scott, P., & Wood-Robinson, C. (1996). Children's ideas about ecology 2: ideas found in children aged 5-16 about the cycling of matter. *International Journal of Science Education*, 18(1), 19–34.  
<https://doi.org/10.1080/0950069960180102>
- Lee, J. K., & Kwon, Y. (2012). *Learning-Related Changes in Adolescents' Neural Networks During Hypothesis-Generating and Hypothesis-Understanding Training*. *Science and Education* (Vol. 21). <https://doi.org/10.1007/s11191-010-9313-4>
- Leech, R., & Sharp, D. J. (2014). The role of the posterior cingulate cortex in cognition and disease. *Brain*. <https://doi.org/10.1093/brain/awt162>
- Legare, C. H., Evans, E. M., Rosengren, K. S., & Harris, P. L. (2012). The Coexistence of Natural and Supernatural Explanations Across Cultures and Development. *Child Development*. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8624.2012.01743.x>
- Leung, H.-C., Skudlarski, P., Gatenby, J. C., Peterson, B. S., & Gore, J. C. (2000). An event-related functional MRI study of the Stroop color word interference task. *Cerebral Cortex*, 10(6), 552–560.
- Levy, B. J., & Wagner, A. D. (2012). Cognitive control and right ventrolateral prefrontal cortex: reflexive reorientation, motor inhibition, and action updating. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1224(1), 40–62.  
<https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.2011.05958.x>Cognitive
- Lezak, M. D., Howieson, D. B., Bigler, E. D., & Tranel, D. (2012). *Neuropsychological Assessment, Fifth Edition* (Oxford Uni). New York, NY.
- Liddle, P. F., Kiehl, K. A., & Smith, A. M. (2001). Event-related fMRI study of response inhibition. *Human Brain Mapping*, 12(2), 100–109. Retrieved from [http://dx.doi.org/10.1002/1097-0193\(200102\)12:2%3C100::AID-HBM1007%3E3.0.CO;2-6](http://dx.doi.org/10.1002/1097-0193(200102)12:2%3C100::AID-HBM1007%3E3.0.CO;2-6)

- Lie, C.-H., Specht, K., Marshall, J. C., & Fink, G. R. (2006). Using fMRI to decompose the neural processes underlying the Wisconsin Card Sorting Test. *NeuroImage*, *30*(3), 1038–1049. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2005.10.031>
- Lin, H.-S., Hung, J.-Y., & Hung, S.-C. (2002). Using the history of science to promote students' problem-solving ability. *International Journal of Science Education*, *24*(5), 453–464. <https://doi.org/10.1080/09500690110073991>
- Lin, T.-C., Lin, T.-J., & Tsai, C.-C. (2013). Research Trends in Science Education from 2008 to 2012: A systematic content analysis of publications in selected journals. *International Journal of Science Education*, 1–27. <https://doi.org/10.1080/09500693.2013.864428>
- Linder, C. J. (1993). A challenge to conceptual change. *Science Education*, *77*(3), 293–300. <https://doi.org/10.1002/sce.3730780311>
- Linnenbrink-Garcia, L., Pugh, K. J., Koskey, K. L. K., & Stewart, V. C. (2012). Developing conceptual understanding of natural selection: The role of interest, efficacy, and Basic prior knowledge. *The Journal of Experimental Education*, *80*(1), 45–68. <https://doi.org/10.1080/00220973.2011.559491>
- Liu, X. (2001). Synthesizing research on student conceptions in science. *International Journal of Science Education*, *23*(1), 55–81. <https://doi.org/10.1080/09500690119778>
- Lombrozo, T., Kelemen, D., & Zaitchik, D. (2007). Inferring design: evidence of a preference for teleological explanations in patients with Alzheimer's disease. *Psychological Science*, *18*(11), 999–1006. <https://doi.org/10.1111/j.1467-9280.2007.02015.x>
- Lubin, A., Vidal, J., Lanoë, C., Houdé, O., & Borst, G. (2013). Inhibitory control is needed for the resolution of arithmetic word problems: A developmental negative priming study. *Journal of Educational Psychology*, *105*(3), 701–708. <https://doi.org/10.1037/a0032625>
- MacDonald, a M., Cohen, J. D., Stenger, V. a, & Carter, C. S. (2000). Dissociating the role of the dorsolateral prefrontal cortex and anterior cingulate cortex in cognitive control. *Science*, *288*(5472), 1835–1838. <https://doi.org/10.1126/science.288.5472.1835>
- Maki, A., Yamashita, Y., Ito, Y., Watanabe, E., Mayanagi, Y., & Koizumi, H. (1995). Spatial and temporal analysis of human motor activity using noninvasive NIR topography. *Medical Physics*, *22*(12), 1997–2005.

- Maldjian, J. A., Laurienti, P. J., Kraft, R. A., & Burdette, J. H. (2003). An automated method for neuroanatomic and cytoarchitectonic atlas-based interrogation of fMRI data sets. *NeuroImage*, *19*(3), 1233–1239. [https://doi.org/10.1016/S1053-8119\(03\)00169-1](https://doi.org/10.1016/S1053-8119(03)00169-1)
- Maloney, D. P., & Siegler, R. S. (1993). Conceptual competition in physics learning. *International Journal of Science Education*, *15*(3), 283–295. <https://doi.org/10.1080/0950069930150306>
- Maloney, D., & Siegler, R. (1993). David Conceptual competition in physics learning. *International Journal of Science Education*, *15*(3), 283–295. <https://doi.org/10.1080/0950069930150306>
- Martin, M. O., Mullis, I. V. S., & Foy, P. (2008). *TIMSS 2007 International Science Report*. Retrieved from [http://timss.bc.edu/TIMSS2007/PDF/TIMSS2007\\_InternationalScienceReport.pdf](http://timss.bc.edu/TIMSS2007/PDF/TIMSS2007_InternationalScienceReport.pdf)
- Martin, M. O., Mullis, I. V. S., Foy, P., & Hooper, M. (2016). *TIMSS 2015 International Results in Science*. Retrieved from <http://timssandpirls.bc.edu/timss2015/international-results/>
- Martin, M. O., Mullis, I. V. S., Foy, P., & Stanco, G. M. (2012). *TIMSS 2011 International Results in Science*. Chestnut Hill, MA.
- Masnack, A. M., Valenti, S. S., Cox, B. D., & Osman, C. J. (2009). A multidimensional scaling analysis of students' attitudes about science careers. *International Journal of Science Education*, *32*(5), 653–667.
- Masson, S., Potvin, P., Riopel, M., & Brault Foisy, L.-M. (2014). Differences in brain activation between novices and experts in science during a task involving a common misconception in electricity. *Mind, Brain, and Education*, *8*(1), 37–48.
- Mattos, C. R. (2014). Conceptual profile as a model of a complex world. In *Conceptual profiles: A theory of teaching and learning scientific concepts* (pp. 263–292). Netherlands: Springer.
- Mazoyer, P., Wicker, B., & Fonlupt, P. (2002). A neural network elicited by parametric manipulation of the attention load. *Neuroreport*, *13*(17), 2331–4. <https://doi.org/10.1097/01.wnr.0000044988.13025.30>

- Mazziotta, J. C., Toga, A. W., Evans, A., Fox, P., & Lancaster, J. (1995). A probabilistic atlas of the human brain: theory and rationale for its development. The International Consortium for Brain Mapping (ICBM). *NeuroImage*, 2(2), 89–101. <https://doi.org/10.1006/nimg.1995.1012>
- Mechelli, A., Henson, R. N. A., Price, C. J., & Friston, K. J. (2003). Comparing event-related and epoch analysis in blocked design fMRI. *NeuroImage*, 18(3), 806–810. [https://doi.org/10.1016/S1053-8119\(02\)00027-7](https://doi.org/10.1016/S1053-8119(02)00027-7)
- Menon, V., Adleman, N. E., White, C. D., Glover, G. H., & Reiss, A. L. (2001). Error-related brain activation during a Go/NoGo response inhibition task. *Human Brain Mapping*, 12(3), 131–143. Retrieved from [http://dx.doi.org/10.1002/1097-0193\(200103\)12:3%3C131::AID-HBM1010%3E3.0.CO;2-C](http://dx.doi.org/10.1002/1097-0193(200103)12:3%3C131::AID-HBM1010%3E3.0.CO;2-C)
- Millar, R. (1989). Constructive criticisms. *International Journal of Science Education*, 11(5), 587–596. <https://doi.org/10.1080/0950069890110510>
- Miller, E. K., & Cohen, J. D. (2001). An integrative theory of prefrontal cortex function. *Annual Review of Neuroscience*, 24(1), 167–202. <https://doi.org/10.1146/annurev.neuro.24.1.167>
- Mills Shaw, K. R., Van Horne, K., Zhang, H., & Boughman, J. (2008). Essay Contest Reveals Misconceptions of High School Students in Genetics Content. *Genetics*, 178(3), 1157–1168. <https://doi.org/10.1534/genetics.107.084194>
- Milner, B. (1963). Effects of different brain lesions on card sorting: The role of the frontal lobes. *Arch Neurol*, 9(1), 90–100. <https://doi.org/10.1001/archneur.1963.00460070100010>
- Mirabella, G. (2014). Should I stay or should I go? Conceptual underpinnings of goal-directed actions. *Frontiers in Systems Neuroscience*, 8, 206. <https://doi.org/10.3389/fnsys.2014.00206>
- Miyake, A., & Friedman, N. P. (2012). The Nature and Organization of Individual Differences in Executive Functions: Four General Conclusions. *Current Directions in Psychological Science*, 21(1), 8–14. <https://doi.org/10.1177/0963721411429458>
- Monchi, O., Petrides, M., Petre, V., Worsley, K., & Dagher, A. (2001). Wisconsin Card Sorting Revisited: Distinct Neural Circuits Participating in Different Stages of the Task Identified by Event-Related Functional Magnetic Resonance Imaging. *J. Neurosci.*, 21(19), 7733–7741. Retrieved from <http://www.jneurosci.org/cgi/content/abstract/21/19/7733>

- Monette, S., & Bigras, M. (2008). La mesure des fonctions exécutives chez les enfants d'âge préscolaire. *Canadian Psychology/Psychologie Canadienne*, 49(4), 323–341. <https://doi.org/10.1037/a0014000>
- Mortimer, E. F. (1995). Conceptual change or Conceptual Profile change? *Science & Education*, 4(3), 267–285. <https://doi.org/10.1007/bf00486624>
- Mortimer, E. F., & El-Hani, C. N. (2014). *Conceptual Profiles: A Theory of Teaching and Learning Scientific Concepts*. Springer.
- Murphy, K., & Garavan, H. (2004). An empirical investigation into the number of subjects required for an event-related fMRI study. *NeuroImage*, 22(2), 879–885. Retrieved from <http://www.sciencedirect.com/science/article/B6WNP-4C8NJMP-1/2/9881d85e3376e79e8cb2db02c68cfc64>
- Nelson, J. K., Lizcano, R. A., Atkins, L., & Dunbar, K. (2007). Conceptual judgments of expert vs. novice chemistry students: an fMRI study. *48th Annual Meeting of the Psychonomic Society*. Hyatt Regency Hotel Long Beach, California.
- NGSS Lead States. (2013). Next Generation Science Standards: For States, by States. *Achieve, Inc. on Behalf of the Twenty-Six States and Partners That Collaborated on the NGSS*, (November), 1–103. <https://doi.org/10.17226/18290>
- Nichols, T., & Hayasaka, S. (2003). Controlling the familywise error rate in functional neuroimaging: a comparative review. *Statistical Methods in Medical Research*, 12(5), 419–446. <https://doi.org/10.1191/0962280203sm341ra>
- Novick, S., & Nussbaum, J. (1981). Pupils' understanding of the particulate nature of matter: A cross-Age study. *Science Education*, 65(2), 187–196. <https://doi.org/10.1002/sci.3730650209>
- Nussbaum, J., & Novick, S. (1982). Alternative frameworks, conceptual conflict and accommodation: Toward a principled teaching strategy. *Instructional Science*, 11(3), 183–200. <https://doi.org/10.1007/BF00414279>
- Nyhus, E., & 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. <https://doi.org/10.1016/j.bandc.2009.03.005>
- OCDE. (2007). PISA 2006. Les compétences en sciences, un atout pour réussir. Volume 1 - Analyse des résultats, 1, 415.

- OCDE. (2008). *Encouraging Student Interest in Science and Technology Studies. Science And Technology*. <https://doi.org/10.1787/9789264040892-en>
- OCDE. (2010). *PISA 2009 Results, What Students Know and Can Do - Student Performance in Reading, Mathematics and Science (Volume I)*. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.1787/9789264091450-en>
- OCDE. (2014). *PISA 2012 Results: What Students Know and Can Do – Student Performance in Mathematics, Reading and Science (Volume I, Revised edition, February 2014)*. Retrieved from <https://www.oecd.org/pisa/keyfindings/pisa-2012-results-volume-I.pdf>
- Office de la qualité et de la responsabilité en éducation OQRE. (2013). Test provincial de compétences linguistiques. Retrieved June 2, 2015, from <http://www.eqao.com/fr/tests/TPCL>
- Ogawa, S., Lee, T. M., Kay, A. R., & Tank, D. W. (1990a). Brain magnetic resonance imaging with contrast dependent on blood oxygenation. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 87(24), 9868–72. <https://doi.org/10.1073/pnas.87.24.9868>
- Ogawa, S., Lee, T. M., Kay, A. R., & Tank, D. W. (1990b). Brain magnetic resonance imaging with contrast dependent on blood oxygenation. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 87(24), 9868–72. <https://doi.org/10.1073/pnas.87.24.9868>
- Ogawa, S., Tank, D. W., Menon, R., Ellermann, J. M., Kim, S. G., Merkle, H., & Ugurbil, K. (1992). Intrinsic signal changes accompanying sensory stimulation: Functional brain mapping with magnetic resonance imaging. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 89(13), 5951–5955. <https://doi.org/10.1073/pnas.89.13.5951>
- Ohlsson, S. (2009). Resubsumption: A Possible Mechanism for Conceptual Change and Belief Revision. *Educational Psychologist*, 44(1), 20–40. <https://doi.org/10.1080/00461520802616267>
- Ola Adeniyi, E. (1985). Misconceptions of selected ecological concepts held by some Nigerian students. *Journal of Biological Education*, 19(4), 311–316. <https://doi.org/10.1080/00219266.1985.9654758>
- Osborne, R. J., & Cosgrove, M. M. (1983). Children's conceptions of the changes of state of water. *Journal of Research in Science Teaching*, 20(9), 825–838. <https://doi.org/10.1002/tea.3660200905>

- Özay, E., & Öztaş, H. (2003). Secondary students' interpretations of photosynthesis and plant nutrition. *Journal of Biological Education*, 37(2), 68–70.  
<https://doi.org/10.1080/00219266.2003.9655853>
- Ozgur, S. (2013). The Persistence of Misconceptions about the Human Blood Circulatory System among Students in Different Grade Levels. *International Journal of Environmental and Science Education*, 8(2), 255–268.
- Palmer, D. (2001). Students' alternative conceptions and scientifically acceptable conceptions about gravity. *International Journal of Science Education*, 23(7), 691–706. <https://doi.org/10.1080/09500690010006527>
- Pauli, R., Bowring, A., Reynolds, R., Chen, G., Nichols, T. E., & Maumet, C. (2016). Exploring fMRI Results Space: 31 Variants of an fMRI Analysis in AFNI, FSL, and SPM. *Frontiers in Neuroinformatics*, 10(July), 24.  
<https://doi.org/10.3389/fninf.2016.00024>
- Penn State University. (2015). SLEIC 5. Retrieved May 20, 2017, from <http://news.psu.edu/photo/242459/2013/02/10/sleic-5>
- Penner, D. E., & Klahr, D. (1996). The Interaction of Domain-Specific Knowledge and Domain-General Discovery Strategies : A Study with Sinking Objects  
Author ( s ): David E . Penner and David Klahr Published by : Wiley on behalf of the Society for Research in Child Development Stable URL :, 67(6), 2709–2727.
- Penny, W., & Henson, R. (2007). Chapter 13 - Analysis of Variance. *Statistical Parametric Mapping*, 166–177. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/B978-012372560-8/50013-9>
- Periago, M. C., & Bohigas, X. (2005). A study of second-year engineering students' alternative conceptions about electric potential, current intensity and Ohm's law. *European Journal of Engineering Education*, 30(1), 71–80.  
<https://doi.org/10.1080/03043790410001711225>
- Piaget, J. (1928). *Judgement and Reasoning in the Child*. *Educational Psychology*.  
<https://doi.org/10.4324/9780203207260>
- Pintrich, P. R., Marx, R. W., & 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, 167–199.

- Planinic, M., Boone, W. J., Krsnik, R., & Beilfuss, M. L. (2006). Exploring alternative conceptions from Newtonian dynamics and simple DC circuits: Links between item difficulty and item confidence. *Journal of Research in Science Teaching*, 43(2), 150–171. <https://doi.org/10.1002/tea.20101>
- Poirel, N., Borst, G., Simon, G., Rossi, S., Cassotti, M., Pineau, A., & Houde, O. (2012). Number conservation is related to children's prefrontal inhibitory control: An fMRI study of a piagetian task. *PLoS ONE*, 7(7). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0040802>
- Poldrack, R. A., Kittur, A., Kalar, D., Miller, E., Seppa, C., Gil, Y., ... Bilder, R. M. (2011a). The Cognitive Atlas: Toward a Knowledge Foundation for Cognitive Neuroscience. *Frontiers in Neuroinformatics*, 5. <https://doi.org/10.3389/fninf.2011.00017>
- Poldrack, R. A., Kittur, A., Kalar, D., Miller, E., Seppa, C., Gil, Y., ... Bilder, R. M. (2011b). The Cognitive Atlas: Toward a Knowledge Foundation for Cognitive Neuroscience. *Frontiers in Neuroinformatics*, 5. <https://doi.org/10.3389/fninf.2011.00017>
- Poldrack, R. A., Mumford, J. A., & Nichols, T. E. (2011). *Handbook of functional MRI data analysis*. Cambridge University Press (Vol. 4).
- Posner, G. J., Strike, K. A., Hewson, P. W., & Gertzog, W. A. (1982). Accommodation of a scientific conception: Toward a theory of conceptual change. *Science Education*, 66, 211–227.
- Potvin, P. (2011). *Manuel d'enseignement des sciences et de la technologie* (MultiMonde). Montréal.
- Potvin, P. (2013). Proposition for improving the classical models of conceptual change based on neuroeducational evidence: conceptual prevalence. *Neuroeducation*, 2(1), 1–28.
- Potvin, P., & 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*, 59(4), 1121–1142. <https://doi.org/10.1002/tea.21396>
- Potvin, P., Masson, S., Lafortune, S., & 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*, (2006), 1–23. <https://doi.org/10.1007/s10763-014-9520-6>

- Potvin, P., Sauriol, E., & 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*.
- Pozo, J. I., & Gomez Crespo, M. A. (2005). The Embodied Nature of Implicit Theories: The Consistency of Ideas About the Nature of Matter. *Cognition and Instruction*, 3(23), 351–387. <https://doi.org/10.1207/s1532690xci2303>
- Renner, J. (1976). *Research, teaching, and learning with the Piaget model*. Norman, OK: University of Oklahoma Press.
- Reuter, Y., Cohen-Azria, C., Daunay, B., Delcambre, I., & Lahanier-Reuter, D. (2007). *Dictionnaire des concepts fondamentaux des didactiques* (De Boeck). Bruxelles.
- Roberts, D. A. (2007). Scientific literacy/science literacy. In S. K. Abell & N. G. Lederman (Eds.), *Handbook of research on science education* (pp. 729–780). New York: Routledge.
- Rowe, J. B., Toni, I., Josephs, O., Frackowiak, R. S., & Passingham, R. E. (2000). The prefrontal cortex: response selection or maintenance within working memory? *Science*, 288(5471), 1656–1660. <https://doi.org/10.1126/science.288.5471.1656>
- Sadler, P., Coyle, H., Cook-Smith, N., & Miller, J. (2007). Misconceptions-oriented standards-based assessment resources for teachers (MOSART). *Cambridge, MA: Harvard College*.
- Sadler, P. M. (1998). Psychometric Models of Student Conceptions in Science : Reconciling Qualitative Studies and Distractor-Driven Assessment Instruments. *Journal of Research in Science Teaching*, 35(3), 265–296.
- 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.

- Sakagami, M., & Pan, X. (2007). Functional role of the ventrolateral prefrontal cortex in decision making. *Current Opinion in Neurobiology*, *17*(2), 228–233. <https://doi.org/10.1016/j.conb.2007.02.008>
- Schultz, A. P. (2011). FIVE (Functional Image Visualization Environment). Retrieved July 21, 2017, from <http://mrtools.mgh.harvard.edu/index.php?title=Downloads>
- Sequeira, M., & Leite, L. (1991). Alternative conceptions and history of science in physics teacher education. *Science Education*, *75*(1), 45–56. <https://doi.org/10.1002/sce.3730750105>
- Shtulman, A., & Harrington, K. (2016). Tensions between science and intuition across the lifespan. *Topics in Cognitive Science*, *8*(1), 118–137.
- Shtulman, A., & Valcarcel, J. (2012). Scientific knowledge suppresses but does not supplant earlier intuitions. *Cognition*, *124*(2), 209–215. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2012.04.005>
- Sigmund, K. (1993). *Games of life: Explorations in ecology, evolution, and behaviour* (Oxford Uni). Oxford, UK.
- Simon, G., Lubin, A., Houdé, O., & De Neys, W. (2015). Anterior cingulate cortex and intuitive bias detection during number conservation. *Cognitive Neuroscience*, *6*(4), 158–168. <https://doi.org/10.1080/17588928.2015.1036847>
- Sinatra, G. M., & Mason, L. (2013). Learner Characteristics and Conceptual Change. In *International Handbook of Research on Conceptual Change* (pp. 377–394).
- Smith, J. P., diSessa, A. A., & Roschelle, J. (1993). Misconceptions reconceived: A constructivist analysis of knowledge in transition. *Journal of the Learning Sciences*, *3*(2), 205. <https://doi.org/10.1207/s15327809jls0302>
- Smith, K. (2012). fMRI 2.0.: Functional magnetic resonance imaging is growing from showy adolescence into a workhorse of brain imaging. *Nature*, *484*(7392), 24–26. <https://doi.org/10.1038/484024a>
- Smith, R. (1992). *Inhibition: History and meaning in the sciences of mind and brain*. Univ of California Press.
- Smith, S. M. (2004). Overview of fMRI analysis. *The British Journal of Radiology*, *77*, S167–S175.

- Sneider, C., Bar, V., & Kavanagh, C. (2006). Learning about Gravity I. Free Fall: A Guide for Teachers and Curriculum Developers. *Astronomy Education Review*, 5(2), 21–52. <https://doi.org/10.3847/AER2006018>
- Snow, C. E. (2010). Academic Language and the Challenge of Reading for Learning About Science. *Science*, 328(5977), 450–452. <https://doi.org/10.1126/science.1182597>
- Solomon, J. (1983). Learning about energy: How pupils think in two domains. *European Journal of Science Education*, 5(1), 49–59. Retrieved from <http://www.informaworld.com/10.1080/0140528830050105>
- Southerland, S. A., Sinatra, G. M., & Matthews, M. R. (2001). Belief, Knowledge, and Science Education. *Educational Psychology Review*, 13(4), 325–351. <https://doi.org/10.1023/A>
- Stanovich, K. E. (2011). *Rationality and the reflective mind*. Oxford: Oxford University Press.
- Starr, B. (2013). How Blue Eyed Parents Can Have Brown Eyed Children. Retrieved from <http://genetics.thetech.org/how-blue-eyed-parents-can-have-brown-eyed-children>
- Stavy, R., Babai, R., Tsamir, P., Tirosh, D., Lin, F.-L., & McRobbie, C. (2006). Are intuitive rules universal? *International Journal of Science & Mathematics Education*, 4, 417–436.
- Stavy, R., Goel, V., Critchley, H., & Dolan, R. (2006). Intuitive interference in quantitative reasoning. *Brain Research*, 1073–1074(1), 383–388. <https://doi.org/10.1016/j.brainres.2005.12.011>
- Stavy, R., & Tirosh, D. (2000). *How students (mis-) understand science and mathematics: Intuitive rules*. Teachers College Press.
- Stead, K., & Osborne, R. (1980). *Gravity* (No. LISP Working Paper 20 University of Waikato, Hamilton, New Zealand.).
- 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 and Error-Processing in a Go/NoGo Task. *Behavioural Brain Research*, 256(505), 529–536. <https://doi.org/10.1016/j.bbr.2013.06.001.A>

- Stroop, J. R. (1935). Stroop color word test. *Journal of Experimental Psychology*, (18), 643–662. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-79948-3>
- Sweet, W. H. (1951). The Uses of Nuclear Disintegration in the Diagnosis and Treatment of Brain Tumor. *New England Journal of Medicine*, 245(23), 875–878. <https://doi.org/10.1056/NEJM195112062452301>
- Swick, D., Ashley, V., & Turken, A. U. (2008). Left inferior frontal gyrus is critical for response inhibition. *BMC Neuroscience*, 9(1), 102. <https://doi.org/10.1186/1471-2202-9-102>
- Taasoobshirazi, G., & Sinatra, G. M. (2011). A structural equation model of conceptual change in physics. *Journal of Research in Science Teaching*, 48(8), 901–918. <https://doi.org/10.1002/tea.20434>
- Talairach, J., & Tournoux, P. (1988a). Co-planar stereotaxic atlas of the human brain, 1988. *Theime, Stuttgart, Germany*, 270, 132. [https://doi.org/10.1016/0303-8467\(89\)90128-5](https://doi.org/10.1016/0303-8467(89)90128-5)
- Talairach, J., & Tournoux, P. (1988b). Co-planar stereotaxic atlas of the human brain, 1988. *Theime, Stuttgart, Germany*, 270, 132. [https://doi.org/10.1016/0303-8467\(89\)90128-5](https://doi.org/10.1016/0303-8467(89)90128-5)
- Tamir, P., Gal-Choppin, R., & Nussinovitz, R. (1981). How do intermediate and junior high school students conceptualize living and nonliving? *Journal of Research in Science Teaching*, 18(3), 241–248.
- Tatar, E. (2011). Prospective primary school teachers' misconceptions about states of matter. *Educational Research and Reviews*, 6(February), 197–200.
- The Tech Museum of Innovation. (2013). What Color Eyes will your Children Have? Retrieved from <http://genetics.thetech.org/online-exhibits/what-color-eyes-will-your-children-have>
- Thirion, B., Flandin, G., Pinel, P., Roche, A., Ciuciu, P., & Poline, J. B. (2006). Dealing with the shortcomings of spatial normalization: Multi-subject parcellation of fMRI datasets. *Human Brain Mapping*, 27(8), 678–693. <https://doi.org/10.1002/hbm.20210>
- Thompson, F., & Logue, S. (2006). An exploration of common student misconceptions in science. *International Education Journal*, 7(4), 553–559.
- Thouin, M. (1996). *Notions de culture scientifique et technologique: Concepts de base, percées historiques et conceptions fréquentes* (MultiMonde). Québec.

- Tipper, S. P. (1985). The negative priming effect: Inhibitory priming by ignored objects. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 37(4), 571–590. <https://doi.org/10.1080/14640748508400920>
- 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. <https://doi.org/10.1080/0272498004200018>
- Toussaint, R. (2002). Dis, Archimède! Comment ça flotte? In *Changement conceptuel et apprentissage des sciences, recherches et pratiques* (Logiques, pp. 41–46). Montréal, Canada.
- Treagust, D., & Duit, R. (2008). Conceptual change: a discussion of theoretical, methodological and practical challenges for science education. *Cultural Studies of Science Education*, 3(2), 297–328. <https://doi.org/10.1007/s11422-008-9090-4>
- Treagust, D. F. (1988). Development and use of diagnostic tests to evaluate students' misconceptions in science. *International Journal of Science Education*, 10(2), 159–169. <https://doi.org/10.1080/0950069880100204>
- Treagust, D. F., & Haslam, F. (1986). Evaluating Secondary Students' Misconceptions of Photosynthesis and Respiration in Plants Using a Two-Tier Diagnostic Instrument.
- Trouille, L. E., Coble, K., Cochran, G. L., Bailey, J. M., Camarillo, C. T., Nickerson, M. D., & Cominsky, L. R. (2013). Investigating student ideas about cosmology III: Big bang theory, expansion, age, and history of the universe. *Astronomy Education Review*, 12(1). <https://doi.org/10.3847/AER2013016>
- Trowbridge, J. E., & Mintzes, J. J. (1988). Alternative conceptions in animal classification: A cross-age study. *Journal of Research in Science Teaching*, 25(7), 547–571.
- Tsujii, T., & Watanabe, S. (2010). Neural correlates of belief-bias reasoning under time pressure: a near-infrared spectroscopy study. *NeuroImage*, 50(3), 1320–1326. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2010.01.026>
- Tzourio-Mazoyer, N., Landeau, B., Papathanassiou, D., Crivello, F., Etard, O., Delcroix, N., ... Joliot, M. (2002). Automated anatomical labeling of activations in SPM using a macroscopic anatomical parcellation of the MNI MRI single-subject brain. *NeuroImage*, 15(1), 273–289. <https://doi.org/10.1006/nimg.2001.0978>

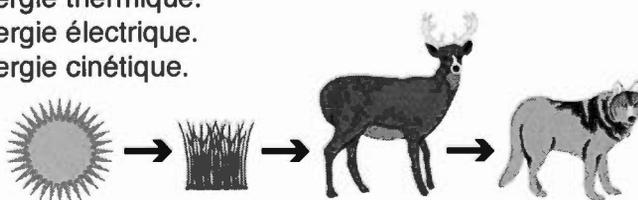
- Van Duijvenvoorde, A. C. K., Zanolie, K., Rombouts, S. A. R. B., Raijmakers, M. E. J., & Crone, E. A. (2008). Evaluating the Negative or Valuing the Positive? Neural Mechanisms Supporting Feedback-Based Learning across Development. *Journal of Neuroscience*, *28*(38), 9495–9503. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.1485-08.2008>
- Vidal, J., Mills, T., Pang, E. W., & Taylor, M. J. (2012). Response inhibition in adults and teenagers: Spatiotemporal differences in the prefrontal cortex. *Brain and Cognition*, *79*(1), 49–59. <https://doi.org/10.1016/j.bandc.2011.12.011>
- Viennot, L. (1979). Spontaneous Reasoning in Elementary Dynamics. *European Journal of Science Education*, *1*(2), 205–221. <https://doi.org/10.1080/0140528790010209>
- Vosniadou, S. (1994). Capturing and modeling the process of conceptual change. *Learning and Instruction*, *4*(1), 45–69. [https://doi.org/10.1016/0959-4752\(94\)90018-3](https://doi.org/10.1016/0959-4752(94)90018-3)
- Vosniadou, S. (2002). On the Nature of Naive Physics. In M. Limon & L. Mason (Eds.), *Reconsidering the Processes of Conceptual Change* (pp. 61–76). Kluwer Academic Publishers.
- Vosniadou, S. (2008). Conceptual change research: An introduction. In S. Vosniadou (Ed.), *International handbook of Research on Conceptual Change* (pp. xiii–xxviii). New York: Routledge.
- Vosniadou, S. (2012). Reframing the classical approach to conceptual change: Preconceptions, misconceptions and synthetic models. In B. J. Fraser, K. Tobin, & C. J. McRobbie (Eds.), *Second International Handbook of Science Education* (pp. 119–130). Dordrecht, Netherlands: Springer.
- Vosniadou, S., Pnevmatikos, D., Makris, N., Eikospentaki, K., Lepenioti, D., Chountala, A., & Kyrianakis, G. (2015). Executive functions and conceptual change in science and mathematics learning. In *Proceedings of the 37th Annual Meeting of the Cognitive Science Society*. Pasadena, California.
- Wagner, A. D. A. D., Bunge, S. A. S. A., & Badre, D. (2004). Cognitive Control, Semantic Memory, and Priming: Contributions from Prefrontal Cortex. In *Cognitive Neurosciences* (pp. 709–725). Retrieved from <http://psycnet.apa.org/psycinfo/2005-01373-095>
- Wandersee, J. H., Mintzes, J. J., & Novak, J. D. (1994). Research on alternative conceptions in science. In D. L. Gabel (Ed.), *Handbook of research on science teaching and learning* (pp. 177–210). New York: Macmillan.

- Ward, J. (2010). The student's guide to cognitive neuroscience (2nd ed.). *The Student's Guide to Cognitive Neuroscience (2nd Ed.)*. Retrieved from <http://ovidsp.ovid.com/ovidweb.cgi?T=JS&PAGE=reference&D=psyc7&NEWS=N&AN=2009-24729-000>
- Ward, J. (2015). The student's guide to cognitive neuroscience (3rd ed.). *The Student's Guide to Cognitive Neuroscience (3rd Ed.)*. Retrieved from <http://ovidsp.ovid.com/ovidweb.cgi?T=JS&PAGE=reference&D=psyc11&NEWS=N&AN=2015-11605-000>
- Weller, H. G. (1995). Diagnosing and altering three aristotelian alternative conceptions in dynamics: Microcomputer simulations of scientific models. *Journal of Research in Science Teaching*, 32(3), 271–290. <https://doi.org/10.1002/tea.3660320307>
- Williamson, K. E., & Willoughby, S. (2012). Student Understanding of Gravity in Introductory College Astronomy. *Astronomy Education Review*, 11, 105. <https://doi.org/10.3847/AER2011025>
- Wright, I., Waterman, M., Prescott, H., & Murdoch-Eaton, D. (2003). A new Stroop-like measure of inhibitory function development: typical developmental trends. *Journal of Child Psychology and Psychiatry*, 44(4), 561–575. <https://doi.org/10.1111/1469-7610.00145>
- Wright, L., Lipszyc, J., Dupuis, A., Thayapararajah, S. W., & Schachar, R. (2014). Response Inhibition and Psychopathology: A Meta-Analysis of Go/No-Go Task Performance. *Journal of Abnormal Psychology*, (August). <https://doi.org/10.1037/a0036295>
- Yip, D. Y. (1998). Teachers' misconceptions of the circulatory system. *Journal of Biological Education*, 32(3), 207–215. <https://doi.org/10.1080/00219266.1998.9655622>
- Zaitchik, D., & Solomon, G. E. (2008). Animist thinking in the elderly and in patients with Alzheimer's disease. *Cognitive Neuropsychology*, 25(1), 27–37. <https://doi.org/10.1080/02643290801904059>
- Zeilik, M., Schau, C., & Mattern, N. (1998). Misconceptions and their change in university-level astronomy courses. *The Physics Teacher*, 36(2), 104–107. <https://doi.org/10.1119/1.880056>

Zucker, R., Kullmann, D., & Schwarz, T. (2004). Release of neurotransmitters: An Introduction to Cellular and Molecular Neuroscience. In J. Byrne & J. Roberts (Eds.), *From molecules to networks* (pp. 197–244). Elsevier Inc.  
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-148660-0.50009-3>

## ANNEXE A – QUESTIONS DE SÉLECTION DES PARTICIPANTS<sup>13</sup>

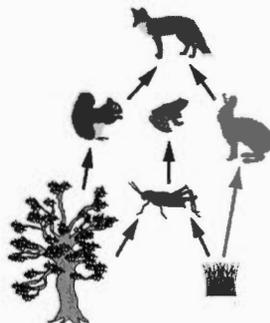
1. Laquelle des affirmations suivantes décrit le mieux la relation entre un organisme et ses cellules?
  - a. Un organisme est un contenant ayant des cellules à l'intérieur de lui.
  - b. Un organisme est un contenant ayant des cellules qui le recouvre.
  - c. Un organisme est une grosse cellule avec d'autres cellules à l'intérieur.
  - d. Un organisme est fait d'une ou de plusieurs cellules.
  - e. Un organisme peut être fait ou non de cellules.
  
2. Parmi les choix suivants, lequel représente des espèces pouvant être en voie d'extinction?
  - a. Les plantes, les animaux et les microorganismes.
  - b. Les plantes, les animaux, mais pas les microorganismes.
  - c. Les plantes seulement.
  - d. Les animaux seulement.
  - e. Les microorganismes seulement.
  
3. Dans la chaîne alimentaire (partie d'un réseau alimentaire) illustrée ci-dessous, comment l'énergie est-elle transmise d'un organisme à un autre?
  - a. Sous forme d'énergie lumineuse.
  - b. Sous forme d'énergie chimique.
  - c. Sous forme d'énergie thermique.
  - d. Sous forme d'énergie électrique.
  - e. Sous forme d'énergie cinétique.



---

<sup>13</sup> Version abrégée et traduite de l'anglais du *Misconceptions-Oriented Standards-Based Assessment* (Sadler et al., 2007).

4. Pourquoi Henri commence-t-il à respirer plus rapidement lorsqu'il fait de l'exercice ? L'oxygène supplémentaire...
- aide ses muscles à utiliser plus d'énergie.
  - l'aide à relâcher de la sueur.
  - arrête la production d'urine pour balancer les pertes d'eau dues à la transpiration.
  - l'aide à conserver l'excédant d'eau jusqu'à ce qu'il puisse aller aux toilettes.
  - l'empêche de surchauffer.
5. Dans un écosystème forestier (voir l'illustration ci-dessous), les écureuils mangent les plantes et les renards mangent les écureuils.



Qu'arriverait-il probablement à la quantité de plantes de cet écosystème si tous les renards disparaissaient subitement ? Au départ, la quantité de plantes...

- ne changerait pas, car les renards ne mangent pas de plantes.
  - ne changerait pas, car d'autres animaux mangeraient les écureuils.
  - diminuerait, car le nombre d'écureuils qui survivent augmenterait.
  - augmenterait, car il y aurait plus de place pour permettre aux plantes de pousser.
  - diminuerait, car les renards protègent les plantes.
6. Lequel des éléments suivants limite le nombre d'organismes qu'un écosystème peut supporter?
- L'eau seulement.
  - Les minéraux seulement.
  - La lumière du Soleil seulement.
  - L'eau et la lumière du Soleil seulement.
  - L'eau, les minéraux et la lumière du Soleil.

7. La raison la plus probable pour expliquer que Marie ait le rhume est ...
- le fait qu'elle soit dehors à l'air froid.
  - qu'elle ne porte pas de chandail chaud.
  - qu'elle soit infectée par un virus.
  - qu'elle soit sortie dehors avec les cheveux mouillés.
  - qu'elle soit demeurée au soleil trop longtemps.
8. Le virus de la grippe s'est probablement propagé, car...
- les humains sont lentement en train d'être exterminés.
  - il s'adapte continuellement aux nouveaux environnements.
  - il veut infecter les gens un peu partout.
  - il est plus intelligent, rapide et fort que la majorité des gens.
  - la surpopulation et la pollution le maintiennent en vie et contagieux.
9. Les cellules à l'intérieur du corps humain puisent leur énergie...
- de la circulation de l'oxygène dans le sang.
  - en décomposant le sucre provenant de la nourriture.
  - en décomposant le sucre qu'elles produisent elles-mêmes.
  - en dégageant du dioxyde de carbone.
  - en dégageant de l'oxygène.
10. La cécité (perte de la vue) peut être causée par des dommages...
- aux yeux seulement.
  - au cerveau seulement.
  - à la moelle épinière seulement.
  - aux yeux ou au cerveau.
  - au cerveau ou à la moelle épinière.
11. Si deux plantes avaient recours à la reproduction *sexuée*, à quoi ressemblerait le bébé-plante qui en découlerait?
- Si le bébé-plante est une femelle, elle ressemblerait à sa mère
  - Si le bébé-plante est un mâle, il ressemblerait à son père.
  - Le bébé-plante serait une combinaison de ses deux parents.
  - Ses fleurs vont ressembler à celles de sa mère et sa tige à celle de son père.
  - Les plantes n'ont jamais recours à la reproduction sexuée.

**12.** Comment un scientifique expliquerait-il la présence de carapaces solides des homards?

Les homards...

- a. ont hérité de leur carapace qui a évolué de génération en génération.
- b. ont appris de leurs parents comment développer une carapace.
- c. ont découvert comment développer une carapace et l'ont transmis à leurs descendants.
- d. ont développé une carapace en réaction aux prédateurs.
- e. préfèrent une carapace extérieure à un squelette interne.

**13.** Lequel des éléments suivants n'est **pas** formé de cellules?

- a. Peau
- b. Sang
- c. Eau
- d. Bactérie
- e. Laitue

**14.** Les girafes actuelles ont des longs cous, car :

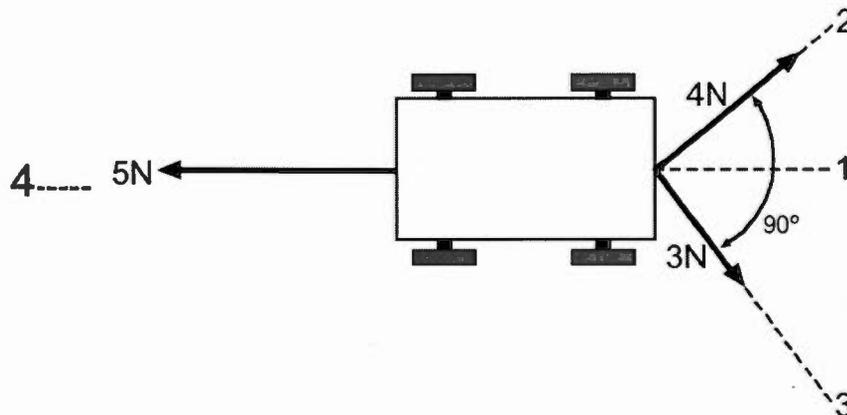
- a. elles les ont étirés pour atteindre les feuilles des arbres.
- b. leurs ancêtres se sont adaptés au fil du temps pour avoir de longs cous.
- c. les girafes avec les cous les plus longs sont les plus fortes et les plus parfaites.
- d. la longueur de leur cou augmente la température de leur corps.
- e. la longueur de leur cou augmente leur vitesse.

**15.** L'écosystème d'un étang est mieux défini par :

- a. seulement les animaux qui vivent dans l'étang.
- b. seulement les plantes qui vivent dans l'étang.
- c. seulement l'eau de l'étang.
- d. les vivants et non-vivants à l'intérieur et autour de l'étang.
- e. les animaux et les plantes qui vivent à l'intérieur et autour de l'étang.

16. Si le chariot est tiré simultanément vers les points 2, 3 et 4, vers quel point le chariot est-il le plus susceptible de se diriger?

- 1
- 2
- 3
- 4
- Le chariot ne bougera pas.



17. Une voiture remplie d'essence roule jusqu'au moment où son réservoir se vide complètement. Qu'est-il arrivé à l'énergie contenue dans l'essence?

- Toute l'énergie a pu être utilisée afin de déplacer la voiture.
  - Une partie a déplacé la voiture et une partie a alimenté la radio, les phares et les autres accessoires.
  - Une partie a déplacé la voiture, une partie a alimenté les accessoires de la voiture et une partie a réchauffé le moteur.
  - Une partie a déplacé la voiture, une partie a alimenté les accessoires de la voiture, une partie a réchauffé le moteur et une partie s'est transformée en bruit et en chaleur.
  - Une partie a déplacé la voiture, une partie a alimenté les accessoires de la voiture, une partie a réchauffé le moteur, une partie s'est transformée en bruit et en chaleur et une partie a été détruite.
18. Si vous êtes au repos en train de regarder un objet se déplacer et qu'il change soudainement de direction, vous pouvez être certain que l'objet...
- a subi une force nette.
  - n'a pas subi de force nette.
  - n'a subi aucune force.
  - gagne de l'énergie cinétique.
  - perd de l'énergie cinétique.

**19.** Une batterie fonctionne en...

- a. emmagasinant de l'énergie électrique.
- b. créant de l'énergie chimique.
- c. convertissant l'énergie chimique en énergie électrique.
- d. convertissant l'énergie électrique en énergie cinétique.
- e. convertissant l'énergie électrique en énergie chimique.

**20.** Les gens portent des vêtements de couleur pâle en été, car ces vêtements...

- a. réfléchissent plus de radiations.
- b. empêchent la sudation (sueur).
- c. ne sont pas aussi lourds que les vêtements foncés.
- d. laissent circuler davantage l'air.
- e. sont fait en coton.

**21.** Une balle de baseball est lancée dans les airs. Au sommet de sa trajectoire...

- a. elle ne subit aucune force nette.
- b. elle subit une force nette.
- c. elle n'accélère pas.
- d. a et c sont vrais.
- e. b et c sont vrais.

**22.** Qu'est-ce qui distingue les ondes radio des rayons X?

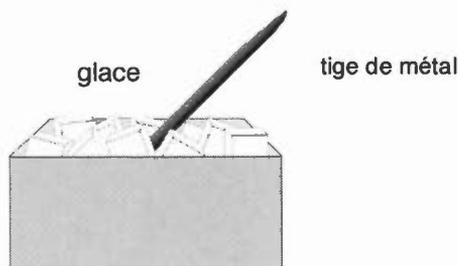
- a. Elles voyagent à des vitesses différentes dans le vide.
- b. Seules les ondes radio peuvent être réfléchies.
- c. Elles ont des longueurs d'onde différentes.
- d. Seulement deux des énoncés précédents sont vrais.
- e. a, b et c sont vrais.

**23.** Jacques ouvre une canette de boisson gazeuse et la laisse sur le comptoir de sa cuisine. Il part faire des corvées et oublie la canette ouverte. Lorsqu'il revient quelques heures plus tard, le poids de la canette ouverte...

- a. sera plus élevé que la canette fermée.
- b. sera plus faible que la canette fermée.
- c. sera le même que la canette fermée.
- d. dépendra de l'humidité relative.
- e. Dépendra du type de boisson.

24. Sophie insère l'extrémité inférieure d'une tige de métal dans une boîte remplie de glace. L'extrémité couverte de glace devient froide. Après un certain temps, Sophie touche l'autre extrémité qui n'était pas couverte de glace et constate que le métal est froid. Que pensez-vous qu'il est arrivé?

- a. Le froid s'est transféré de la partie inférieure à la partie supérieure.
- b. La tige a donné de la chaleur à la glace.
- c. Le froid s'est déplacé de la main de Sophie vers la tige.
- d. La chaleur s'est déplacée de la tige vers la main de Sophie.
- e. Cela dépend de la température initiale de la tige.

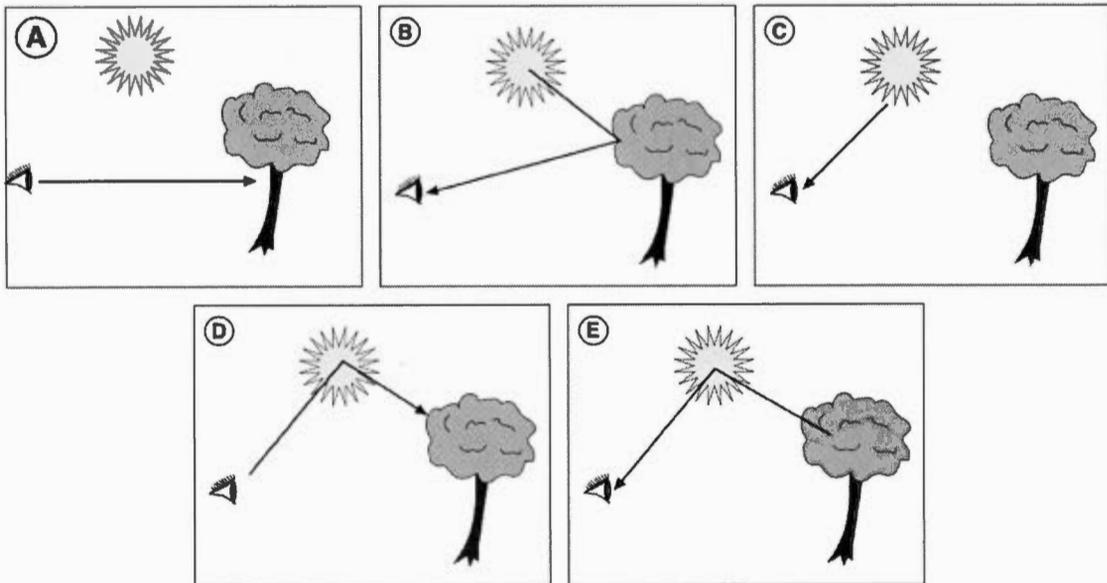


25. Si la Lune disparaissait instantanément, qu'arriverait-il aux marées des océans de la Terre?

- a. Les marées seraient les mêmes qu'avant la disparition de la Lune.
- b. Il y aurait seulement de plus petites marées causées par le Soleil.
- c. Il y aurait une marée basse en permanence partout sur la Terre.
- d. Il y aurait une marée haute en permanence partout sur la Terre.
- e. Il n'y aurait plus de marées.

26. Zoé est assise dans son jardin en train de regarder un arbre. Avec lequel des énoncés suivants, au sujet de la façon dont elle est capable de voir un arbre, êtes-vous d'accord?

- La lumière de ses yeux se rend à l'arbre et elle voit l'arbre (A).
- La lumière du Soleil se rend à l'arbre et ensuite à ses yeux et elle voit l'arbre (B).
- La lumière du Soleil se rend à ses yeux et elle voit l'arbre (C).
- La lumière de ses yeux se rend au Soleil et ensuite à l'arbre et elle voit l'arbre (D).
- La lumière de l'arbre se rend au Soleil et ensuite à ses yeux et elle voit l'arbre (E).

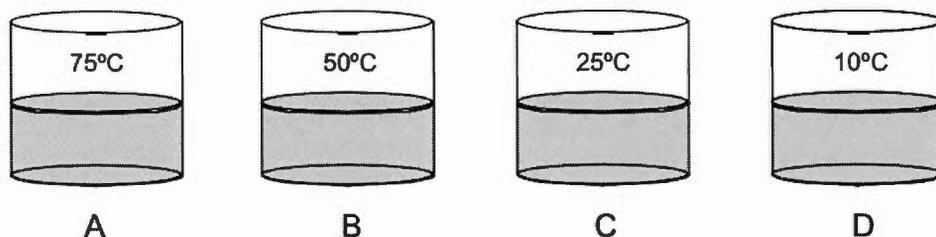


27. Une balle en caoutchouc coule lorsqu'elle est placée dans de l'eau. Que se passera-t-il si la balle était coupée en deux et qu'un des morceaux était placé dans l'eau?

- Le petit morceau va flotter.
- Le petit morceau va couler.
- Le petit morceau va demeurer immobile.
- Le petit morceau va se dissoudre.
- Il est impossible de prédire ce qui se produira.

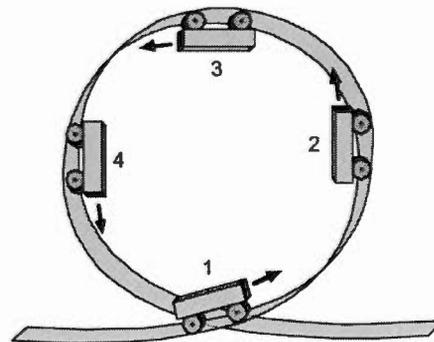
28. Quatre contenants d'eau dont les températures diffèrent sont placés sur une table dans une pièce dont la température est de 25°C. Après quatre heures, quel contenant d'eau aura transféré la plus grande quantité d'énergie thermique à la pièce?

- A
- B
- C
- D
- Ils vont tous transférer la même quantité.



29. Un wagon traverse une boucle telle qu'illustrée ci-contre. À quel endroit du parcours la gravité est-elle absente?

- 1
- 2
- 3
- 4
- La gravité est la même partout.



30. Après qu'un rayon lumineux soit réfléchi sur un miroir plan accroché au mur :

- il voyage possiblement dans une direction différente.
- il se déplace à une vitesse différente qu'avant sa réflexion.
- sa longueur d'onde est différente.
- son énergie est plus élevée.
- Toutes ces réponses.

ANNEXE B – QUESTIONS DE COMPRÉHENSION DU FRANÇAIS  
ÉCRIT

Extrait du Test provincial de compétences linguistiques de l'Ontario  
(Office de la qualité et de la responsabilité en éducation OQRE, 2013)

## Texte 1

### Le radeau écologique Plastiki achève son périple à Sydney<sup>14</sup>

Après avoir quitté la ville de San Francisco aux États-Unis le 22 mars 2010, un bateau composé de milliers de bouteilles en plastique recyclable, le *Plastiki*, est arrivé dans le port de Sydney en Australie le 26 juillet 2010. Cette expédition maritime était destinée à sensibiliser le public à la pollution des océans.

Long de 18 mètres, ce radeau-catamaran a été conçu et imaginé par David de Rothschild, fondateur de « Adventure Ecology », un organisme dont la mission est de sensibiliser la population à l'importance de respecter et de sauvegarder l'environnement.

Au terme d'un périple de près de 15 000 km, soit quatre mois à travers les vastes étendues de l'océan Pacifique, l'équipage du *Plastiki* a été accueilli à Sydney par des centaines de personnes. « C'est incroyable. Nous sommes si heureux d'être ici », a déclaré David de Rothschild.

Ce bateau est réalisé avec du plastique recyclable assemblé avec de la colle organique à base de brou de noix\* de cajou et de sucre de canne, tandis que les voiles contiennent du plastique recyclé. La double-coque compte 12 500 bouteilles, qui assurent au bateau 68 % de sa flottabilité. Il n'utilise que de l'énergie renouvelable provenant du soleil, du vent ou de turbines marines ainsi que de générateurs alimentés par des vélos.



David de Rothschild avait imaginé ce bateau après avoir été touché par la lecture d'un rapport des Nations Unies sur les écosystèmes océaniques. Il a notamment insisté sur la quantité de plastique flottant à la surface des océans puis se dégradant. « Vous êtes au milieu de nulle part et, là, vous voyez... ces plastiques. Ils se dégradent à la lumière, deviennent de plus en plus petits jusqu'à pouvoir être mangés par les poissons », a-t-il dit.

À la suite de ce trajet mémorable, le *Plastiki* a été exposé quelque temps au musée maritime de Sydney.

\* brou de noix : teinture brune tirée du brou de la noix, c'est-à-dire de l'enveloppe de la noix

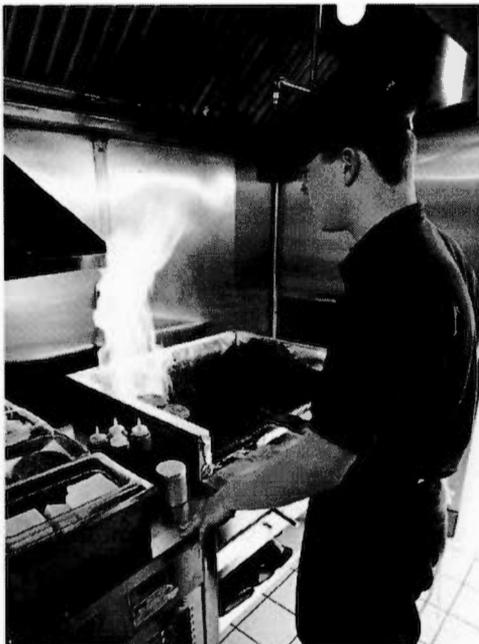
<sup>14</sup> Extrait du *Test provincial de compétences linguistiques* de l'Ontario – Avril 2013 - <http://www.eqao.com/>

### Questions à choix multiple

1. Par quel mot pourrait-on remplacer « périple » dans le titre?
  - a. rêve
  - b. aventure
  - c. reportage
  - d. catamaran
  
2. Pourquoi David de Rothschild a-t-il décidé de fabriquer son bateau à partir de matériaux organiques et recyclés?
  - a. pour faire un voyage
  - b. pour devenir célèbre
  - c. pour lutter contre la pollution
  - d. pour récolter des faits sur l'océan
  
3. Qu'est-ce qui assure principalement la flottabilité du *Plastiki*?
  - a. les vents
  - b. les voiles
  - c. les turbines
  - d. les bouteilles
  
4. À quoi sert le mot « notamment » au 5<sup>e</sup> paragraphe?
  - a. à établir une conclusion
  - b. à comparer deux éléments
  - c. à préciser un détail important
  - d. à énumérer des étapes complexes
  
5. Pourquoi le plastique qui flotte sur l'eau inquiète-t-il David de Rothschild?
  - a. Il modifie les courants d'eau.
  - b. Il affecte le passage des bateaux.
  - c. Il s'accumule au fond des océans.
  - d. Il se retrouve dans la chaîne alimentaire.

## Texte 2

Le ministère du Travail de l'Ontario a renforcé les mesures relatives à la sécurité des jeunes au travail. En effet, des études ont révélé que le risque d'accident du travail est plus élevé chez les jeunes travailleurs – ceux qui ont entre 15 et 24 ans – que chez les travailleurs plus âgés. Récemment, on relevait que plus de 39 000 jeunes travailleurs avaient été blessés au travail en Ontario au cours d'une année.



Selon une enquête canadienne sur la santé, les ados et les jeunes adultes courent deux fois plus de risques de se blesser au travail que les adultes plus âgés, et environ 1,5 fois plus de risques si l'on tient compte des types d'emploi que les jeunes occupent et de leur tendance à travailler à temps partiel, par exemple dans la restauration rapide.

Au Canada, les jeunes occupent généralement des postes plus difficiles physiquement que les adultes, ce qui accroît le risque de blessure. Une enquête effectuée en Ontario a montré que les jeunes étaient davantage soumis à des conditions de travail moins sécuritaires que les travailleurs plus âgés. Les risques principaux auxquels les jeunes travailleurs font face sont les suivants : travailler sur une échelle, dans un escalier ou en hauteur; utiliser des couteaux; manipuler des substances ou des équipements chauds; manier du matériel mobile; se servir d'une trancheuse d'aliments ainsi que travailler près d'équipements ou de machines en marche.

En Ontario, le ministère du Travail a établi des mesures qui doivent être appliquées par les employeurs afin de protéger les jeunes travailleurs. À peine 23 % des jeunes de 15 à 24 ans qui occupaient leur poste depuis moins de un an ont dit avoir reçu une formation en sécurité ou en utilisation de l'équipement. Toutefois, 46 % ont déclaré n'avoir reçu aucune formation...

**Questions à choix multiple**

1. Les jeunes travailleurs ont besoin d'une formation en sécurité parce qu'ils...
  - a. sont très nombreux.
  - b. travaillent à temps partiel.
  - c. fréquentent encore l'école.
  - d. occupent des emplois à risque.
  
2. Quel mot se rapproche le plus du sens de « accroît » à la 18<sup>e</sup> ligne?
  - a. explique
  - b. confirme
  - c. augmente
  - d. développe
  
3. Quel mot « auxquels » remplace-t-il à la 20<sup>e</sup> ligne?
  - a. jeunes
  - b. risques
  - c. suivants
  - d. travailleurs
  
4. Pour améliorer la sécurité, le ministère du Travail a imposé des mesures qui obligent les employeurs à mieux...
  - a. payer les jeunes travailleurs.
  - b. former les jeunes travailleurs.
  - c. motiver les jeunes travailleurs.
  - d. sélectionner les jeunes travailleurs.
  
5. À quoi sert la dernière phrase de ce texte?
  - a. à susciter la réflexion
  - b. à citer un point de vue
  - c. à donner une description
  - d. à rappeler le début du texte
  - e.
  
6. Comment présente-t-on les informations dans ce texte?
  - a. en exposant des faits
  - b. en comparant des emplois
  - c. en énumérant des travaux à risque
  - d. en décrivant des conditions de travail

## ANNEXE C – TÂCHE COGNITIVE

### **Consignes aux participants :**

1. Déterminer si les énoncés suivants sont scientifiquement corrects ou incorrects.
2. Si l'énoncé est scientifiquement correct, appuyer sur le bouton gauche.
3. Si l'énoncé est scientifiquement incorrect, appuyer sur le bouton droit.

### **Interprétation du tableau :**

Colonne « Num. » : Numéro de l'énoncé. Le premier énoncé d'une paire est congruent et le deuxième énoncé appelé énoncé prime « ' » est incongruent.

Colonnes « Rép » : Réponse. Énoncé scientifiquement correct (V = vrai) ou scientifiquement incorrect (F = faux).

Colonne « Énoncé » : Les énoncés présentés aux participants.

Colonne « Conception spontanée » : La conception spontanée à partir de laquelle l'énoncé énoncé prime « ' » incongruent a été construit ainsi que la référence d'une étude qui relate cette conception.

Colonne « Lien avec le PFÉQ » : Concept questionné par l'énoncé tel qu'il se trouve dans le Programme de formation de l'école québécoise.

### Énoncés de la tâche cognitive

Num.	Domaine	Rép.	Énoncé	Conception spontanée	Lien avec le PFÉQ
1	Ondes	F	La lumière et les ondes radio sont gazeuses	Les ondes radio et lumineuses sont différentes. (Driver et al., 2015; Zeilik et al., 1998)	Spectre électromagnétique (Gouvernement du Québec, 2007c)
1'		V	La lumière et les ondes radio sont de même nature.		
2	Ondes	F	Les ondes radio sont des ondes visibles.	Les ondes radio sont des ondes sonores. (Shulman & Valcarcel, 2012)	Spectre électromagnétique et ondes sonores (Gouvernement du Québec, 2007c)
2'		F	Les ondes radio sont des ondes audibles.		
3	Ondes	V	Les ondes lumineuses voyagent dans le vide.	Le son peut être poussé dans le vide. (Eshach & Schwartz, 2006)	Spectre électromagnétique et ondes sonores (Gouvernement du Québec, 2007c)
3'		F	Les ondes sonores voyagent dans le vide.		
4	Ondes	V	Les ondes lumineuses voyagent plus vite que les ondes sonores.	Les ondes radio et les rayons-X diffèrent par leur vitesse. (Sadler et al., 2010)	Spectre électromagnétique (Gouvernement du Québec, 2007c)
4'		F	Les ondes radio et les rayons-X voyagent à différentes vitesses.		
5	Astronomie	F	Une année-lumière est une unité de mesure de la masse.	Une année-lumière est une unité de temps. (Trouille et al., 2013)	Année-lumière (Gouvernement du Québec, 2007c)
5'		V	Une année-lumière est une unité de mesure de la distance.		
6	Astronomie	F	Le Soleil tourne autour de la Lune.	La Lune ne tourne qu'autour de la Terre. (Baxter, 1989)	Système solaire (Gouvernement du Québec, 2006c, p. 288)
6'		V	La Lune tourne autour du Soleil.		
7	Astronomie	F	La force gravitationnelle est la même sur la Lune que sur la Terre.	La gravité est plus faible sous l'eau. (Driver et al., 2015; Stead & Osborne, 1980)	Gravitation universelle (Gouvernement du Québec, 2006c, p. 288)
7'		V	La force gravitationnelle est la même sous l'eau que sur la terre ferme.		
8	Astronomie	V	Le système solaire contient plusieurs planètes.	Le système solaire contient plusieurs étoiles dans l'espace. (Sadler et al., 2010)	Système solaire (Gouvernement du Québec, 2006c, p. 288)
8'		F	Le système solaire contient plusieurs étoiles.		
9	Astronomie	V	La Lune tourne autour de la Terre.	Le cycle jour/nuit est causé par la rotation du Soleil autour de la Terre. (S Vosniadou, 1994)	Cycle du jour et de la nuit (Gouvernement du Québec, 2006c, p. 288)
9'		F	Le Soleil tourne autour de la Terre.		
10	Astronomie	F	La Lune est une étoile.	Le Soleil n'est pas une étoile. (Dunlop, 2000)	Système solaire (Gouvernement du Québec, 2006c, p. 288)
10'		V	Le Soleil est une étoile.		

## Énoncés de la tâche cognitive (suite)

Num	Domaine	Rép	Énoncé	Conception spontanée	Lien avec le PFÉQ
11	Changement de phase	F	Les bulles de gaz qui se forment dans l'eau en ébullition sont faites d'hélium.	Les bulles dans un liquide en ébullition sont composées d'air. (Johnson, 1998)	Cycle de l'eau, transformation physique (Gouvernement du Québec, 2006c, p. 284,287)
11'		V	Les bulles de gaz qui se forment dans l'eau en ébullition sont faites d'eau.		
12	Changement de phase	F	Lorsqu'un cube de glace fond, l'eau se décompose.	Plus la température augmente, plus le volume augmente. (Osborne & Cosgrove, 1983)	Cycle de l'eau, états de la matière (Gouvernement du Québec, 2006c, p. 284,287)
12'		V	Lorsqu'un cube de glace fond, l'eau se contracte.		
13	Changement de phase	F	L'eau qui bout contient des bulles d'azote et d'hélium.	Les bulles dans l'eau en ébullition sont composées d'O <sub>2</sub> et de N <sub>2</sub> . (Coştu et al., 2010)	Cycle de l'eau, transformation physique (Gouvernement du Québec, 2006c, p. 284,287)
13'		F	L'eau qui bout contient des bulles d'oxygène et d'hydrogène.		
14	Changement de phase	V	L'eau liquide est plus dense que la vapeur d'eau.	Les solides sont plus lourds que les liquides. (Durmuş & Bayraktar, 2010)	Cycle de l'eau, états de la matière (Gouvernement du Québec, 2006c, p. 284,287)
14'		F	L'eau gelée est plus dense que l'eau liquide.		
15	Changement de phase	V	Chauder une casserole d'eau tiède augmente sa température.	La température varie lors d'un changement de phase. (Sadler et al., 2007; Sadler et al., 2010)	Cycle de l'eau, états de la matière (Gouvernement du Québec, 2006c, p. 284,287)
15'		F	Chauder une casserole d'eau bouillante augmente sa température.		
16	Matière	F	1 mL de verre comprend la même quantité de matière que 2 mL de verre.	La masse et le volume reflètent tous deux la quantité de matière. (Holding, 1987)	Masse, volume (Gouvernement du Québec, 2006c, p. 284)
16'		F	1 mL de verre comprend la même quantité de matière que 1 mL de fer.		
17	Matière	V	Un cube de fer contient des atomes.	Il n'y a pas d'espace entre les particules. (Novick & Nussbaum, 1981)	Atome (Gouvernement du Québec, 2006c, p. 285)
17'		V	Un cube de fer contient du vide.		
18	Matière	F	Un gramme de styromousse est plus massif qu'un gramme de fer.	Les substances denses sont plus massives. (Driver et al., 2015; Hewson, 1986)	Masse volumique (Gouvernement du Québec, 2007c)
18'		F	Un gramme de fer est plus massif qu'un gramme de styromousse.		
19	Matière	V	Un astronaute possède le même volume sur la Terre que sur la Lune.	La masse et le poids sont identiques. (Driver et al., 2015; Gonen, 2008)	Relation entre la masse et le poids (Gouvernement du Québec, 2007b)
19'		V	Un astronaute possède la même masse sur la Terre que sur la Lune.		
20	Matière	V	Les gaz se dilatent lorsqu'il fait plus chaud.	Les solides ne se dilatent pas. (AAAS, 2017; Herrmann-Abell & DeBoer, 2007)	Température (dilatation thermique) (Gouvernement du Québec, 2006c, p. 284)
20'		V	Le béton se dilate lorsqu'il fait plus chaud.		

### Énoncés de la tâche cognitive (suite)

No	Domaine	Rép	Énoncé	Conception spontanée	Lien avec le PFÉQ
21	Diversité du vivant	F	Les cactus sont des animaux.	Les arachnides et les insectes ne sont pas des animaux. (Trowbridge & Mintzes, 1988)	Classification des êtres vivants (Gouvernement du Québec, 2006b, p. 159)
21'		V	Les araignées sont des animaux.		
22	Diversité du vivant	F	Les baleines sont des reptiles.	Les baleines sont de gros poissons. (Kubiatko & Prokop, 2007)	Classification des êtres vivants (Gouvernement du Québec, 2006b, p. 159)
22'		F	Les baleines sont des poissons.		
23	Diversité du vivant	F	Les baleines sont génétiquement plus proches des plantes que des poissons.	Les baleines sont de proches cousins des poissons. (Shtulman & Valcarcel, 2012)	Évolution et taxonomie (Gouvernement du Québec, 2006c, p. 285)
23'		F	Les baleines sont génétiquement plus proches des poissons que des humains.		
24	Diversité du vivant	V	Les gorilles sont des animaux.	Les humains ne sont pas des animaux. (Thompson & Logue, 2006)	Évolution et taxonomie (Gouvernement du Québec, 2006c, p. 285)
24'		V	Les humains sont des animaux.		
25	Diversité du vivant	F	Les gorilles sont des invertébrés.	Les animaux qui possèdent des articulations sont des vertébrés. (Braund, 1998)	Classification des êtres vivants (Gouvernement du Québec, 2006b, p. 159)
25'		V	Les homards sont des invertébrés.		
26	Diversité du vivant	F	Les chevaux sont des invertébrés.	Les animaux qui possèdent des articulations sont des vertébrés. (Braund, 1998)	Classification des êtres vivants (Gouvernement du Québec, 2006b, p. 159)
26'		F	Les serpents sont des invertébrés.		
27	Organisation du vivant	F	Les pierres sont des tissus biologiques.	Seuls les muscles et le sang sont des tissus biologiques. (Sadler et al., 2013)	Tissus, organes et systèmes (Gouvernement du Québec, 2007c)
27'		V	Les os sont des tissus biologiques.		
28	Organisation du vivant	F	L'air est formé de cellules	L'eau est formée de cellules. (Sadler et al., 2013)	Cellules végétales et animales (Gouvernement du Québec, 2006c, p. 286)
28'		F	L'eau est formée de cellules.		
29	Organisation du vivant	V	Les cellules sont plus grosses que les chromosomes.	Les protéines sont des molécules plus grosses que les cellules. (Dreyfus & Jungwirth, 1989)(R Driver et al., 2015)	Cellules (Gouvernement du Québec, 2006c, p. 286) et protides (Gouvernement du Québec, 2007c)
29'		F	Les protéines sont plus grosses que les cellules.		
30	Organisation du vivant	V	Les ovules contiennent des chromosomes.	Les chromosomes ne sont situés que dans les gamètes. (Banet & Ayuso, 2000)	Division cellulaire (Gouvernement du Québec, 2007c)
30'		V	Les neurones contiennent des chromosomes.		

## Énoncés de la tâche cognitive (suite)

No	Domaine	Rép	Énoncé	Conception spontanée	Lien avec le PFÉQ
31	Maintien de la vie	F	La chlorophylle peut être une source d'énergie pour les cellules animales.	Les protéines servent à la construction ou la réparation des tissus. (Yip, 1998)	Types d'aliments (eau, protéides, etc.) (Gouvernement du Québec, 2007c)
31'		V	Les protéines peuvent être une source d'énergie pour les cellules animales.		
32	Maintien de la vie	V	La respiration des plantes a lieu la nuit.	Les plantes respirent seulement la nuit. (Özay & Öztas, 2003)	Photosynthèse et respiration (Gouvernement du Québec, 2006c, p. 286)
32'		V	La respiration des plantes a lieu le jour.		
33	Maintien de la vie	V	Les plantes émettent de l'oxygène gazeux.	Les plantes ne font que de la photosynthèse. (Tregust & Haslam, 1986)	Photosynthèse et respiration (Gouvernement du Québec, 2006c, p. 286)
33'		V	Les plantes émettent du gaz carbonique.		
34	Maintien de la vie	V	Les plantes aux feuilles vertes font de la photosynthèse.	La chlorophylle est le seul pigment photosynthétique. (Tregust, 1988)	Photosynthèse et respiration (Gouvernement du Québec, 2006c, p. 286)
34'		V	Les plantes aux feuilles rouges font de la photosynthèse.		
35	Maintien de la vie	V	La respiration cellulaire implique de l'oxygène.	La respiration n'implique pas de conversion d'énergie. (Gayford, 1986)	Intrants et extrants (énergie, nutriments, etc.) (Gouvernement du Québec, 2006c, p. 286)
35'		V	La respiration cellulaire transforme de l'énergie.		
36	Maintien de la vie	V	Les insectes sont vivants.	Ce qui est bouge est vivant. (Tamir, Gal-Choppin, & Nussinovitz, 1981)	Les caractéristiques du vivant (Gouvernement du Québec, 2006b, p. 159)
36'		F	Un feu de camp est vivant		
37	Maintien de la vie	V	Les cellules sont vivantes.	Les noix et graines ne sont vivants qu'une fois semées. (Tamir et al., 1981)	Les caractéristiques du vivant (Gouvernement du Québec, 2006b, p. 159)
37'		V	Les noix sont vivantes.		
38	Écosystèmes	F	Les pierres font partie de la chaîne alimentaire.	Seuls les animaux font partie de la chaîne alimentaire. (Gallegos, Jerezano, & Flores, 1994)	Relations trophiques (Gouvernement du Québec, 2007c)
38'		V	Les plantes font partie de la chaîne alimentaire.		
39	Écosystèmes	V	Il y a plus d'organismes à la base d'une chaîne alimentaire qu'au sommet.	Les maillons supérieurs de la chaîne alimentaire accumulent l'énergie. (Adeniyi, 1985)	Relations trophiques et flux d'énergie (Gouvernement du Québec, 2007c)
39'		F	Il y a plus d'énergie au sommet d'une chaîne alimentaire qu'à sa base.		
40	Écosystèmes	V	Les substances biodégradables ne sont pas radioactives.	Les substances biodégradables ne peuvent être polluantes. (M. J. Brody, 1994)	Contaminant (Gouvernement du Québec, 2007b)
40'		F	Les substances biodégradables ne sont pas polluantes.		

### Énoncés de la tâche cognitive (suite)

No	Domaine	Rép	Énoncé	Conception spontanée	Lien avec le PFÉÉQ
41	Écosystèmes	F	Lors de la décomposition, de la matière se crée.	La décomposition est la disparition de la matière. (Leach et al., 1996)	Recyclage chimique (Gouvernement du Québec, 2007c)
41'		F	Lors de la décomposition, de la matière disparaît.		
42	Écosystèmes	V	Une substance synthétique peut être polluante.	Les substances naturelles ne peuvent être polluantes. (Brody, 1992; Brody, 1994; Driver et al., 2015)	Contaminant (Gouvernement du Québec, 2007b)
42'		V	Une substance naturelle peut être polluante.		
43	Écosystèmes	F	Les pierres compétitionnent pour les ressources dont elles ont besoin.	Les végétaux ne compétitionnent pas pour les ressources. (AAAS, 2017e)	Dynamique des communautés (Gouvernement du Québec, 2007b)
43'		V	Les plantes compétitionnent pour les ressources dont elles ont besoin.		
44	Phénomènes terrestres	F	Sans la Lune, il n'y aurait pas de saisons sur la Terre.	Seule l'action de la Lune cause les marées sur Terre. (Sadler et al., 2010)	Système Terre-Lune (effet gravitationnel). (Gouvernement du Québec, 2007c)
44'		F	Sans la Lune, il n'y aurait pas de marées sur la Terre.		
45	Phénomènes terrestres	F	La variation de la distance entre la Terre et Mars cause les saisons.	La variation de la distance entre la Terre et le Soleil cause les saisons. (Sneider et al., 2006)	Saisons (Gouvernement du Québec, 2006c, p. 288)
45'		F	La variation de la distance entre la Terre et le Soleil cause les saisons.		
46	Phénomènes terrestres	F	La Terre tourne autour de son axe en une saison.	La révolution de la Terre se fait autour de son axe en une année. (Sadler et al., 2010)	Rotation de la Terre (Gouvernement du Québec, 2006b, p. 159)
46'		F	La Terre tourne autour de son axe en une année.		
47	Énergie	F	Une voiture roulant à 50 km/h a la même énergie cinétique qu'un vélo roulant à 10 km/h.	L'énergie cinétique ne dépend que de la vitesse. (AAAS, 2017c)	Relation : énergie cinétique masse et vitesse (Gouvernement du Québec, 2007b)
47'		F	Une voiture roulant à 10 km/h a la même énergie cinétique qu'un vélo roulant à 10 km/h.		
48	Énergie	F	Un verre d'eau à 50°C contient autant d'énergie thermique qu'une goutte d'eau à 25°C.	Deux corps à la même température ont la même chaleur. (Kesidou & Duit, 1993)	Relation : énergie thermique et température (Gouvernement du Québec, 2007b)
48'		F	Un verre d'eau à 25°C contient autant d'énergie thermique qu'une goutte d'eau à 25°C.		
49	Énergie	V	Une chandelle allumée émet un rayonnement infrarouge.	Seuls les objets chauds émettent un rayonnement infrarouge. (AAAS, 2017f)	Spectre électromagnétique (Gouvernement du Québec, 2007c)
49'		V	Une chandelle éteinte émet un rayonnement infrarouge.		
50	Énergie	V	Un feu de camp contient de l'énergie thermique.	Seuls les objets chauds contiennent de l'énergie thermique (AAAS, 2017d)	Formes d'énergies (thermique) (Gouvernement du Québec, 2007c)
50'		V	Un cube de glace contient de l'énergie thermique.		

### Énoncés de la tâche cognitive (suite)

No	Domaine	Rép	Énoncé	Conception spontanée	Lien avec le PFÉQ
51	Dynamique	V	La Terre attire les cailloux.	Les corps plus massifs exercent la gravité. (Williamson & Willoughby, 2012)	Gravitation universelle (Gouvernement du Québec, 2006c, p. 288)
51'		V	Les cailloux attirent la Terre.		
52	Dynamique	V	La Terre attire la nacelle d'une montgolfière.	Les gaz ne sont pas soumis à la force de gravité. (Tatar, 2011)	Gravitation universelle (Gouvernement du Québec, 2006c, p. 288)
52'		V	La Terre attire l'air chaud d'une montgolfière.		
53	Dynamique	V	Un livre qui tombe d'une étagère est attiré par la Terre.	Les objets immobiles ne subissent pas la force de gravité. (Palmer, 2001)	Gravitation universelle (Gouvernement du Québec, 2006c, p. 288)
53'		V	Un livre posé sur une étagère est attiré par la Terre.		
54	Magnétisme	V	Les aimants attirent une tige de fer.	Les métaux sont attirés par les aimants. (Hickey & Schibeci, 1999)	Électromagnétisme (Gouvernement du Québec, 2007d)
54'		F	Les aimants attirent une tige d'aluminium.		
55	Évolution	F	Le singe descend de l'humain.	Les espèces évoluent vers la forme plus évoluée, l'être humain. (Heddy & Sinatra, 2013)	Évolution (sélection naturelle) (Gouvernement du Québec, 2006c, p. 285)
55'		F	L'humain descend du singe.		
56	Évolution	F	Les premiers humains vivaient en même temps que les mammoth.	Les humains et les dinosaures ont coexisté. (Conseil de la science et de la technologie, 2002)	Évolution (Gouvernement du Québec, 2006c, p. 285)
56'		V	Les premiers humains vivaient en même temps que les dinosaures.		
57	Génétique	F	Les roches ont de l'ADN.	Seuls certaines bactéries et certains champignons ont de l'ADN. (Mills Shaw, Van Horne, Zhang, & Boughman, 2008)	Caractéristiques du vivant (Gouvernement du Québec, 2006c, p. 286)
57'		V	Les champignons ont de l'ADN.		
58	Génétique	V	Un adulte possède davantage de cellules qu'un embryon.	Lors de la croissance, ce sont les cellules qui grossissent. (A.A.S., 2017b)	Stades du développement humain (Gouvernement du Québec, 2006c, p. 286)
58'		F	Un adulte possède de plus grosses cellules qu'un enfant.		
59	Hérédité	F	Des parents aux yeux bleus peuvent avoir des enfants aux yeux bruns. <sup>1</sup>	Un enfant reçoit une seule copie de chaque gène. (Shtulman & Valcarcel, 2012)	Dominance et récessivité (Gouvernement du Québec, 2007b)
59'		V	Des parents aux yeux bruns peuvent avoir des enfants aux yeux bleus.		
60	Système circulatoire	F	Le sang est réoxygéné dans les os.	Le sang et l'oxygène se mélangent dans le cœur. (Arnaudin & Mintzes, 1985)	Systèmes circulatoires et respiratoires (Gouvernement du Québec, 2007c)
60'		F	Le sang est réoxygéné dans le cœur.		

### Énoncés de la tâche cognitive (suite et fin)

No	Domaine	Rép	Énoncé	Conception spontanée	Lien avec le PFÉQ
61	Système circulatoire	F	Le sang dans les artères est plutôt bleu.	Le sang dans les veines est bleu. (Arnaud & Mintzes, 1985)	Système circulatoire (types de vaisseaux) (Gouvernement du Québec, 2007c)
61'		F	Le sang dans les veines est plutôt bleu.		
62	Système circulatoire	V	Le cœur pompe du sang.	Le cœur fabrique le sang. (Arnaud & Mintzes, 1985)	Système circulatoire (Gouvernement du Québec, 2007c)
62'		F	Le cœur fabrique du sang.		
63	Système circulatoire	V	Le cœur fait circuler le sang.	Le cœur nettoie le sang. (Arnaud & Mintzes, 1985)	Systèmes circulatoire et excréteur (Gouvernement du Québec, 2007c)
63'		F	Le cœur filtre le sang.		
64	Électricité	V	Un déplacement d'électrons produit un courant électrique.	L'électricité est produite par un déplacement d'électrons. (Garnett & Treagust, 1992)	Circuits électriques (Gouvernement du Québec, 2007b)
64'		V	Un déplacement de protons produit un courant électrique.		

<sup>i</sup> Dans de rares cas, des parents aux yeux bleus peuvent donner naissance à un enfant aux yeux bruns (Starr, 2013). Toutefois, comme il s'agit d'un événement peu fréquent, la conception selon laquelle des parents aux yeux bruns ne peuvent avoir d'enfants aux yeux bleus est acceptée dans plusieurs publications pédagogiques et scientifiques (p.ex. The Tech Museum of Innovation, 2013).

ANNEXE D – FORMULAIRE D'INFORMATION ET DE  
CONSENTEMENT POUR PARTICIPANTS MINEURS

**Formulaire d'information et de consentement  
(PARTICIPANTS MINEURS)**

**RNQ**

**COMITÉ MIXTE D'ÉTHIQUE DE LA RECHERCHE**

**Titre du projet de recherche :** Mécanismes cérébraux liés à la compréhension de concepts scientifiques.

**Chercheur responsable du projet de recherche :** Steve Masson, Ph.D., professeur, Université du Québec à Montréal.

**Collaborateurs :** Geneviève Allaire-Duquette, étudiante au doctorat à l'Université du Québec à Montréal,  
Michel Bélanger, professeur à l'Université du Québec à Rimouski.  
Roland H. Grabner, professeur à l'Université Georg-August, Allemagne.

**Organisme subventionnaire :** Fonds québécois de recherche sur la société et la culture

---

Formulaire d'information et de consentement approuvé le 6 février 2014 par le Comité mixte d'éthique de la recherche du RNQ.

CMER RNQ 13-14-024 – Participant majeur - Version du 6 février 2014.

**Préambule**

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

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

**Nature et objectifs du projet de recherche**

Ce projet de recherche vise à mieux comprendre, à l'aide de l'imagerie par résonance magnétique, les mécanismes cérébraux liés à la compréhension des concepts scientifiques que votre enfant apprend à l'école. Les résultats de ce projet pourraient, à terme, mener à des pistes d'intervention susceptibles d'aider les élèves à apprendre les sciences.

Pour la réalisation de ce projet de recherche, nous comptons recruter 40 participants, garçons et filles, âgés de 16 à 19 ans.

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

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

L'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle permet, quant à elle, de voir les zones du cerveau qui deviennent actives lorsqu'on demande à une personne d'effectuer une tâche. En effet, lorsque la personne effectue la tâche demandée, il y a une augmentation de l'arrivée de sang dans la partie du cerveau qui contrôle cette activité. L'arrivée du sang provoque un changement dans le signal émis par le cerveau et cette modification de signal peut être détectée par l'appareil.

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

**Déroulement du projet de recherche**

Ce projet de recherche se déroulera au Centre de recherche de l'Institut universitaire de gériatrie de Montréal.

La participation de votre enfant à ce projet de recherche consistera à passer une imagerie par résonance magnétique. Lors de l'imagerie, nous lui demanderons d'effectuer certaines tâches qui nous permettront de capter les images de son cerveau pendant qu'il effectue ces tâches. La tâche 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.

La durée totale de la tâche sera d'environ 25 minutes. La durée totale de la participation de votre enfant à ce projet de recherche sera de 3 heures, ce qui inclut (1) le questionnaire préalable à l'étude qui sera rempli à l'école (1 heure), les étapes préparatoires à l'imagerie par résonance magnétique (1 heure) et la collecte des images du fonctionnement de son cerveau (1 heure, incluant le temps d'attente).

### **Avantages associés au projet de recherche**

Votre enfant ne retirera aucun bénéfice personnel de sa participation à ce projet de recherche. Cependant, les connaissances acquises permettront de contribuer à une meilleure compréhension des mécanismes cérébraux liés à la 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. Votre enfant pourrait aussi ressentir un certain stress ou une sensation de claustrophobie.

### **Risques associés au projet de recherche**

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

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

**Risques associés à la grossesse**

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

Les adolescentes 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**

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

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

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

Toute nouvelle connaissance acquise durant le déroulement du projet qui pourrait affecter votre décision de permettre à votre enfant de continuer à participer à ce projet vous sera communiquée sans délai, verbalement et par écrit.

## **Confidentialité**

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

Ces renseignements peuvent comprendre les informations concernant son nom, son sexe, sa date de naissance, son école et ses résultats aux questionnaires de compréhension en science et de compétence linguistique qu'il aura réalisé en classe.

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

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

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

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

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

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

### **Études ultérieures**

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

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

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

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

**Oui**  **Non**

### **Participation à des études ultérieures**

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

**Oui**  **Non**

### **Financement du projet de recherche**

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

### **Compensation**

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 du cerveau de votre enfant.

### **Indemnisation en cas de préjudice et droits du sujet de recherche**

Si votre enfant devait subir quelque préjudice que ce soit dû à sa participation au projet de recherche, il recevra tous les soins et services requis par son état de santé, sans frais de votre part.

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

### **Procédures en cas d'urgence médicale**

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

### **Identification des personnes-ressources**

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

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

### **Surveillance des aspects éthiques du projet de recherche**

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

**Consentement**

Titre du projet de Mécanismes cérébraux liés à la compréhension de  
recherche : concepts scientifiques

**Consentement du représentant légal**

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

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

---

**Nom de l'enfant mineur**

---

**Signature de l'enfant mineur donnant son assentiment**

---

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

---

**Date**

---

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

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

---

**Signature de la personne qui obtient le consentement****Date**

**Signature et engagement du chercheur responsable de ce projet de recherche**

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

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

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

---

**Signature du chercheur responsable de ce projet de recherche**

---

**Date**

ANNEXE E – FORMULAIRE D’INFORMATION ET DE  
CONSENTEMENT POUR PARTICIPANTS MAJEURS

**Formulaire d’information et de consentement  
(PARTICIPANTS MAJEURS)**

**RNQ**

**COMITÉ MIXTE D’ÉTHIQUE DE LA RECHERCHE**

**Titre du projet de recherche :** Mécanismes cérébraux liés à la compréhension de concepts scientifiques.

**Chercheur responsable du projet de recherche :** Steve Masson, Ph.D., professeur, Université du Québec à Montréal.

**Collaborateurs :** Geneviève Allaire-Duquette, étudiante au doctorat à l’Université du Québec à Montréal,  
Michel Bélanger, professeur à l’Université du Québec à Rimouski.  
Roland H. Grabner, professeur à l’Université Georg-August, Allemagne.

**Organisme subventionnaire :** Fonds québécois de recherche sur la société et la culture

---

Formulaire d’information et de consentement approuvé le 6 février 2014 par le Comité mixte d’éthique de la recherche du RNQ.

CMER RNQ 13-14-024 – Participant majeur - Version du 6 février 2014.

## **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.

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

## **Nature et objectifs du projet de recherche**

Ce projet de recherche vise à mieux comprendre, à l'aide de l'imagerie par résonance magnétique, les mécanismes cérébraux liés à la compréhension des concepts scientifiques que vous apprenez à l'école. Les résultats de ce projet pourraient, à terme, mener à des pistes d'intervention susceptibles d'aider les élèves à apprendre les sciences.

Pour la réalisation de ce projet de recherche, nous comptons recruter 40 participants, garçons et filles, âgés de 16 à 19 ans.

## **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. La tâche 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.

La durée totale de la tâche sera d'environ 25 minutes. La durée totale de votre participation à ce projet de recherche sera de 3 heures, ce qui inclut (1) le questionnaire préalable à l'étude qui sera rempli à l'école (1 heure), les étapes préparatoires à l'imagerie par résonance magnétique (1 heure) et la collecte des images du fonctionnement de votre 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 la 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 mixte d'éthique de la recherche du RNQ ou l'organisme subventionnaire peuvent mettre fin à votre participation, sans votre consentement, si de nouvelles découvertes ou informations indiquent que votre participation au projet n'est plus dans votre intérêt, si vous ne respectez pas les consignes du projet de recherche ou 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, votre école 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 mixte d'éthique de la recherche du RNQ ou par l'établissement ou par une personne mandatée par des organismes publics autorisés. Toutes ces personnes et ces organismes adhèrent à une politique de confidentialité.

À des fins de protection, notamment afin de pouvoir communiquer avec vous rapidement, 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 mixte d'éthique de la recherche du RNQ 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 de l'organisme subventionnaire pour mener à bien ce projet de recherche.

### **Compensation**

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. Si vous le désirez, vous recevrez également une image numérique de votre cerveau. 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 Fonds

québécois de recherche sur la société et la culture et l'établissement de leur responsabilité civile et professionnelle.

### **Procédures en cas d'urgence médicale**

Veillez noter que l'Institut universitaire de gériatrie de Montréal n'est pas un centre hospitalier de soins de courte durée qui offre des services d'urgence et qui compte sur la présence sur place d'un médecin 24 heures sur 24. Par conséquent, advenant une condition médicale qui nécessiterait des soins immédiats, les premiers soins 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 local aux plaintes et à la qualité des services de l'IUGM, au numéro suivant : (514) 340-2109.

### **Surveillance des aspects éthiques du projet de recherche**

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

## Consentement

Titre du projet de Mécanismes cérébraux liés à la compréhension de  
recherche : concepts scientifiques

### I. Consentement du sujet

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 sujet de recherche**

**Date**

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

J'ai expliqué au sujet de recherche 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**

### III. Signature et engagement du chercheur responsable du projet de recherche

Je certifie qu'on a expliqué au sujet de recherche les termes du présent formulaire d'information et de consentement, que l'on a répondu aux questions que le sujet de recherche 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.

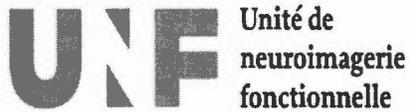
Je m'engage, avec l'équipe de recherche, à respecter ce qui a été convenu au formulaire d'information et de consentement et à en remettre une copie signée et datée au sujet de recherche.

---

**Signature du chercheur responsable du projet de recherche**

**Date**

ANNEXE F – FORMULAIRE DE DÉPISTAGE



Formulaire de dépistage  
pour étude en IDM

<b>Nom</b>		<b>Prénom</b>	
<b>Date de naissance (aaaa/mm/jj):</b>			
<b>Date</b>	<b>de</b>	<b>Sexe :</b>	F      M
<b>naissance (aaaa/mm/jj):</b>			
<b>Grandeur :</b>	_____ cm	<b>Poids :</b>	_____ kg
<b>Chercheur (ou) Projet (ou) No éthique :</b>			
<b>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.</b>			
<b>1. Avez-vous déjà subi une opération ?</b>			
	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			
<b>2. Portez-vous ?</b>			
		Non	Oui

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

<b>Nom</b>	<b>Prénom</b>

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

<b>PARTICIPANT:</b>		
_____	_____	_____
<b>Lettres moulées</b>	<b>Signature</b>	<b>Date</b>

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

## ANNEXE G – PARAMÈTRES D'ACQUISITION DES IMAGES FONCTIONNELLES ET ANATOMIQUES

- 
- Images fonctionnelles  
(T2\*)
- Appareil : Siemens TrioTim 3,0 Tesla
  - Temps de répétition (TR) = 2 000 ms
  - Temps d'écho = 30 ms
  - *Flip angle* = 90°
  - Taille des vs = 3 mm X 3mm X 3 mm
  - Ordre d'acquisition = *Interleaved*
  - Orientation des tranches : *AC-PC line* (commissure antérieure – commissure postérieure)
  - Nombre de tranches = 33
  - *Field of view (FOV)* = 192 mm
  - Résolution dans le plan (matrice) = 64 X 64
  - Antenne de tête : 32 canaux
  - Épaisseur des tranches = 3,0 mm
  - Espace entre les tranches : 25%

- 
- Images anatomiques  
(T1)
- Appareil : Siemens TrioTim 3,0 Tesla
  - 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 (FOV)* = 256
  - Résolution dans le plan (matrice) = 256 X 256
  - Antenne de tête : 32 canaux

---

ms : millisecondes

## ANNEXE H – PROTOCOLE DE COLLECTE

### Étape 1 – Préparation

- Accueillir et remercier le participant de sa présence. Annoncer les trois étapes du rendez-vous (préparation, simulation, scan);
- Relire et signer les formulaires de consentement en revoyant en détails les points « risques » et « participation volontaire au projet » ;
- Relire et signer le formulaire de dépistage en s’assurant que le participant ne présente pas de contre-indication ;
- Vérifier que le participant ne porte pas :

Bijoux/Bagues/Boucles d'oreilles	Appareil de métal
Épingles à cheveux	Maquillage
Élastiques à cheveux	Dentier
Soutien-gorge contenant du métal (ex: cerceaux dans les bonnets)	Mousse ou gel pour les cheveux
Montre	Cheveux mouillés
Épingles de sûreté	Verres de contact de couleur

### Étape 3 – Simulation

- Visiter l’UNF avec le participant en montrant la salle d’IRMf et de contrôle;
- Installer les boîtes de réponse
- Faire réaliser la tâche de pratique par le participant sur l’ordinateur en lisant avec lui les consignes à l’écran.
  - Déterminer si les énoncés suivants sont scientifiquement corrects ou incorrects.

- Si l'énoncé est correct, appuyer sur le bouton gauche. Si l'énoncé est incorrect, appuyer sur le bouton droit.
  - Vous avez 10 secondes pour répondre à chacun des énoncés. Répondez le mieux, mais aussi le plus rapidement possible.
  - Les énoncés seront présentés en blocs de 4. Suite à chacun des blocs, une croix de fixation s'affichera pendant 15 secondes.
  - Il suffit de se reposer et de regarder la croix, mais il n'est pas nécessaire de la fixer.
- Si le participant pose une question sur la tâche, lui rappeler la consigne qui est de déterminer si l'énoncé est scientifiquement correct ou incorrect.
  - Prévenir le participant que les énoncés sont présentés dans un ordre aléatoire;
  - Installer le participant dans le simulateur et vérifier qu'il est confortable.
  - Installer les boîtes de réponse et rappeler au participant qu'il est important de rester immobile.
  - Faire réaliser la tâche de pratique par le participant dans le simulateur.
  - Vérifier si le participant bouge (surtout la tête) dans le simulateur lorsqu'il donne ces réponses;
  - Faire entendre le bruit du scan;
  - S'il reste du temps, le participant peut attendre dans la salle d'attente avant le début de la séance d'IRMf.
  - En conclusion, expliquer au participant le déroulement du scan qui se fait en plusieurs étapes :
    - localisateur (13s), test des boutons
    - tâche Vrai ou Faux 4 X env. 6 min / pause 1m 30s (yeux fermés)
    - scan anatomique 9 min (repos)
  - Rappeler les consignes principales :
    - Il ne faut pas bouger tant que l'appareil émet un son (et éviter les mouvements importants même entre les séquences);

- Avertir qu'il y aura des bouchons pour les oreilles et un casque d'écoute (expliquer comment placer les bouchons);
- Insister sur l'**importance de ne pas bouger**;
- La croix de fixation sert à se reposer et éviter que les yeux bougent.
- Dire qu'il y aura un bouton en forme de poire pour les urgences; il faut appuyer seulement si cela est nécessaire. Dire qu'on entend ce que le participant dit, mais pas durant les séquences (à cause du bruit), d'où la poire.

### **Étape 3 – IRMf**

- Installer le participant dans la salle d'IRM avec la technicienne (bonnet, bouchon, boîte de réponse droite et gauche);
- Avertir le participant du début et ensuite la technicienne débute la séquence le localiseur (durée : environ 0m13s);
- Vérifier que le fil de la boîte de réponse est branché dans le hub USB et faire un test avec *Bloc Notes* en demandant au participant d'appuyer sur les boutons.
- Débuter la Run1\_verbale
- Pause de 90 secondes pour le participant. Vérifier qu'il est confortable et rappeler de ne pas bouger.
- Débuter la Run2\_verbale [PAUSE 90 s] Run3\_verbale [PAUSE 90 s] et Run4\_verbale.
- Scan anatomique (yeux fermés).

### **Étape 4 – Raccompagnement des sujets**

- Remercier le participant et le parent de leur participation;
- Recueillir les commentaires (s'il y a lieu) et les noter sur la feuille de route;
- Annoncer que la photo numérique sera envoyée par courriel dans les prochains jours;
- Raccompagnement à la porte et derniers remerciements.

## ANNEXE I – LETTRE D’INVITATION AUX PARENTS EN VUE DU RECRUTEMENT



Unité de  
neuroimagerie  
fonctionnelle



Université du Québec  
à Montréal



Objet : Participation à un projet de recherche en neuroimagerie portant sur la  
compréhension des concepts scientifiques

Cher parent,

Nous invitons votre enfant à participer à un projet de recherche en neuroimagerie. Ce projet vise à mieux comprendre les mécanismes cérébraux liés à la compréhension des concepts scientifiques que votre enfant apprend à l'école. Les résultats de ce projet pourraient, à terme, mener à des pistes d'intervention susceptibles d'aider les élèves à apprendre les sciences. Ce projet de recherche sera réalisé au Centre de recherche de l'IUGM au 4565 chemin Queen-Mary, Montréal, près du métro Snowdon. La durée totale de la participation de votre enfant à ce projet, incluant le temps d'attente, sera d'au plus deux heures. Sa 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 l'activité cérébrale de son cerveau.

Joint à cette lettre, vous trouverez un formulaire de consentement contenant plus de détails. Si vous acceptez que votre enfant participe à ce projet, votre enfant devra rapporter ce formulaire rempli et signé à son enseignant.

Merci d'avance pour votre soutien.

Steve Masson Ph.D., Éducation

Professeur en neuroéducation

Centre de recherche en neurosciences de l'UQAM

Annonce publicitaire approuvée le 6 février 2014 par le Comité mixte d'éthique de la recherche du RNQ dans le cadre du projet CMER RNQ 13-14 – 024

## ANNEXE J – MASQUES UTILISÉS LORS DE L'ANALYSE PAR RÉGIONS D'INTÉRÊT

Source:

- *Automated Anatomical Labeling (AAL) Atlas* (Tzourio-Mazoyer et al., 2002)
- *WFU\_PickAtlas* (Maldjian et al., 2003)

### Cortex préfrontal ventrolatéral

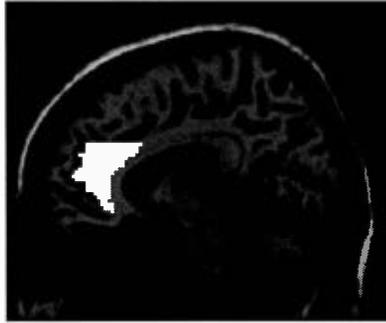


*Inferior frontal gyrus left and right (orbital) z = -6*

### Cortex préfrontal dorsolatéral



*Middle frontal gyrus left and right (orbital) z = -6*

**Cortex cingulaire antérieur**

*Cingulum anterior left and right x = 10*