

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL

LE RÔLE DE L'INHIBITION DANS LA CAPACITÉ À SURMONTER
DES INTERFÉRENCES INTUITIVES EN SCIENCES

MÉMOIRE PRÉSENTÉ
COMME EXIGENCE PARTIELLE
DE LA MAITRISE EN ÉDUCATION

PAR
STÉPHANIE LAFORTUNE

MARS 2013

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL
Service des bibliothèques

Avertissement

La diffusion de ce mémoire se fait dans le respect des droits de son auteur, qui a signé le formulaire *Autorisation de reproduire et de diffuser un travail de recherche de cycles supérieurs* (SDU-522 – Rév.01-2006). Cette autorisation stipule que «conformément à l'article 11 du Règlement no 8 des études de cycles supérieurs, [l'auteur] concède à l'Université du Québec à Montréal une licence non exclusive d'utilisation et de publication de la totalité ou d'une partie importante de [son] travail de recherche pour des fins pédagogiques et non commerciales. Plus précisément, [l'auteur] autorise l'Université du Québec à Montréal à reproduire, diffuser, prêter, distribuer ou vendre des copies de [son] travail de recherche à des fins non commerciales sur quelque support que ce soit, y compris l'Internet. Cette licence et cette autorisation n'entraînent pas une renonciation de [la] part [de l'auteur] à [ses] droits moraux ni à [ses] droits de propriété intellectuelle. Sauf entente contraire, [l'auteur] conserve la liberté de diffuser et de commercialiser ou non ce travail dont [il] possède un exemplaire.»



REMERCIEMENTS

Plusieurs personnes ont contribué de différentes façons à la réalisation de ce mémoire. Sans leur appui, ce projet de recherche n'aurait probablement jamais été mené à terme. Je tiens à leur témoigner ici toute ma gratitude.

Mes remerciements vont d'abord à mon directeur de recherche, M. Patrice Potvin, professeur-chercheur au Département de didactique à l'Université du Québec à Montréal (UQAM). Ses commentaires enrichissants et son expertise en didactique des sciences m'ont été profitables tout au long de l'élaboration de mon mémoire. Il a aussi contribué à mettre en place toutes les conditions favorables me permettant de réaliser ce projet.

Je souhaite aussi remercier chaleureusement Steve Masson, professeur à l'UQAM, qui a grandement contribué à enrichir mes réflexions de recherche. Il a su m'apporter, à divers moments, des suggestions pertinentes, des encouragements et des conseils éclairés. Son enthousiasme, sa grande disponibilité et son dévouement ont indéniablement contribué aux mérites de ce projet.

De plus, je tiens à souligner l'apport de Martin Riopel et de Patrick Charland qui, en tant que membres du comité d'évaluation de ce projet, m'ont aidé à clarifier ma pensée et à en préciser l'expression par leurs commentaires constructifs et judicieux. Des membres de l'Équipe de recherche en éducation scientifique et technologique (EREST) de l'UQAM, notamment Geneviève Allaire-Duquette, Éline Turmel et Lucile Rapin, m'ont aussi prodigué de précieux conseils qui ont permis de bonifier ce projet.

Un gros merci aux élèves et enseignants qui ont accepté de participer à cette recherche, ainsi qu'à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la collecte de données, particulièrement Frédéric Fortin, technicien informatique de l'EREST.

Je désire aussi remercier tous les professeurs, chargés de cours et enseignants qui sont intervenus dans ma formation et qui m'ont permis de développer les connaissances, les compétences et la pensée critique que je possède aujourd'hui.

Un merci tout particulier à mes collègues de la maîtrise en éducation et amis, Lorie-Marlène Brault-Foisy, Jean-Guillaume Dumont et Karine Véronneau, dont la contribution tant morale qu'intellectuelle fut très appréciée. Ils sont devenus de véritables complices au cours du chemin que nous avons parcouru ensemble.

Je souligne aussi la contribution financière du *Conseil de recherche en sciences humaines du Canada* et du *Fonds québécois de recherche sur la société et la culture* dans le cadre de cette étude.

Enfin, je désire remercier ma famille, mon copain et mes amis qui m'ont soutenue au cours de l'élaboration de ce projet. Leurs encouragements et leur support m'ont permis d'aller de l'avant et de persévérer. Je me considère privilégiée d'avoir été accompagnée par toutes ces personnes.

TABLE DES MATIÈRES

LISTE DES TABLEAUX	vii
LISTE DES FIGURES	viii
RÉSUMÉ	ix
ABSTRACT	x
INTRODUCTION	1
CHAPITRE I : PROBLÉMATIQUE	3
1.1 Problème de recherche.....	3
1.1.1 <i>La résistance des conceptions initiales erronées</i>	4
1.1.2 <i>Limites de nos connaissances sur le changement conceptuel</i>	5
1.1.3 <i>L'interférence des règles intuitives</i>	5
1.1.4 <i>Mécanismes cérébraux sous-tendant les règles intuitives</i>	7
1.2 Objectif de recherche.....	8
1.3 Pertinence sociale et scientifique de la recherche.....	8
CHAPITRE II : CADRE THÉORIQUE	11
2.1 Les biais du raisonnement	11
2.2 Les conceptions erronées en sciences.....	14
2.2.1 <i>Le modèle de Nussbaum et Novick</i>	15
2.2.2 <i>Le modèle de Posner, Strike, Hewson et Gertzog</i>	15
2.2.3 <i>Le modèle de Giordan et de Vecchi</i>	16
2.2.4 <i>Le modèle de Vosniadou</i>	16
2.2.5 <i>Le modèle de diSessa</i>	17
2.2.6 <i>Le modèle de Stavy et Tirosh</i>	17
2.2.7 <i>Catégorisation et synthèse des modèles de changement conceptuel</i>	19
2.3 Mécanismes cérébraux liés au changement conceptuel en sciences.....	20
2.3.1 <i>L'étude de Dunbar, Fugelsang et Stein en mécanique</i>	20
2.3.2 <i>L'étude de Masson en électricité</i>	21
2.4 Le rôle de l'inhibition dans la capacité de surmonter des interférences intuitives	22
2.4.1 <i>Développement des connaissances autour de l'inhibition</i>	23
2.4.1 <i>Régions cérébrales liées à l'inhibition</i>	25
2.4.3 <i>Surmonter les interférences intuitives lors de tâches scolaires</i>	27
2.4.2 <i>Développement de l'inhibition</i>	29

2.5 L'immédiateté : caractéristique des réponses intuitives	32
2.6 Hypothèses de recherche	34
2.7 Choix d'étudier les interférences intuitives autour du concept de masse volumique	35
2.7.1 L'origine des difficultés des élèves	36
2.8 Choix de l'approche transversale	38
CHAPITRE III : MÉTHODOLOGIE.....	41
3.1 L'instrument de collecte de données	41
3.1.1 Description de l'instrument.....	41
3.1.2 Description de la tâche.....	42
3.1.2.1 Stimuli présentés.....	43
3.1.2.2 Variables pouvant influencer le temps de réaction	45
3.1.2.3 Tâche de pratique	47
3.2 Déroulement de la collecte de données	48
3.2.1 Bloc de pratique.....	48
3.2.2 Tâche informatisée	49
3.3 Sources de données.....	50
3.3.1 Caractéristiques des sujets	50
3.3.2 Échantillonnage.....	52
3.3.3 Exclusions.....	53
3.4 Considérations éthiques.....	53
3.4.1 Consentement	53
3.4.2 Confidentialité	54
CHAPITRE IV : RÉSULTATS ET INTERPRÉTATION.....	55
4.1 Méthode d'analyse des résultats	55
4.2 Résultats	56
4.2.1 Distribution et moyenne des temps de réaction dans les différentes conditions.....	56
4.2.2 Comparaison des temps de réaction aux stimuli intuitifs et contre-intuitifs	64
4.2.3 Vérification de la relation entre le niveau scolaire des élèves et l'exactitude de leurs réponses aux stimuli contre-intuitifs.....	67
4.2.4 Vérification de la relation entre le temps de réaction aux stimuli contre-intuitifs réussis et l'âge des élèves	70
CONCLUSION	75
APPENDICE A : FORMULAIRE D'INFORMATION ET DE CONSENTEMENT	79
BIBLIOGRAPHIE	81

LISTE DES TABLEAUX

1. Conceptions erronées fréquentes, d'après Thouin (2005)	4
2. Définitions issues de la méta-analyse de Murphy et Alexander	14
3. Exemples d'application de la règle intuitive « <i>more A-more B</i> »	18
4. Exemples de stimuli intuitifs et contre-intuitifs	44
5. Exemples de stimulus et versions de la tâche	46
6. Exemple de stimuli et versions de la tâche de pratique	47
7. Distribution des sujets selon le niveau scolaire et le sexe	51
8. Distribution des sujets selon le niveau scolaire et la main dominante	52
9. Statistiques descriptives en lien avec le temps de réaction	57
10. Moyenne du temps de réaction dans les différentes conditions	58
11. Moyenne du temps de réaction en fonction de l'exactitude des réponses, du type de stimulus et de l'année scolaire du sujet	58
12. Test de l'homogénéité des variances de Levene	64
13. Test de Mann-Whitney comparant le temps de réaction pour les stimuli intuitifs et contre-intuitifs lors de réponses correctes	65
14. Test de Mann-Whitney comparant le temps de réaction pour les stimuli intuitifs et contre-intuitifs lors de réponses incorrectes	66
15. Tableau croisé Exactitude des réponses lors de la tâche * Niveau scolaire pour les stimuli contre-intuitifs	68
16. Test de Khi-deux mesurant le lien entre l'exactitude des réponses des élèves aux stimuli contre-intuitifs et leur niveau scolaire	68
17. Mesures d'associations (Phi et V de Cramer) pour le test de Khi-2	68
18. Analyse de corrélation entre le temps de réaction et l'âge pour les stimuli contre-intuitifs répondus correctement	70

LISTE DES FIGURES

1. Vue latérale du cortex frontal.....	24
2. Exemple de stimuli dans le Wisconsin Card Sorting Test	24
3. Exemple de stimuli dans la tâche de Stroop.....	25
4. Stimuli sans interférence intuitive.....	28
5. Stimuli avec interférence intuitive	28
6. Écran gris servant de pause	43
7. Éventail de toutes les boules présentées.....	44
8. Doigts utilisés pour répondre à la tâche.	45
9. Touches A, B, C et D sur le clavier.....	45
10. Exemples de stimuli de la tâche de pratique	47
11. Informations demandées aux sujets.....	48
12. Instructions données d'abord à l'oral, puis affichées à l'écran (pratique).....	49
13. Informations données d'abord à l'oral, puis affichées à l'écran.....	50
14. Extrait de la progression des apprentissages au primaire	51
15. Extrait de la progression des apprentissages au secondaire	51
16. Histogramme des fréquences du temps de réaction	57
17. Diagramme en boîte et moustaches du temps de réaction selon le niveau.....	60
18. Diagramme en boîte et moustaches du temps de réaction selon le type de stimulus présenté.....	60
19. Diagramme en boîte et moustache du temps de réaction selon l'exactitude des réponses	60
20. Diagramme en bâton de la moyenne du temps de réaction en fonction du niveau scolaire, de l'âge et du type de stimulus présenté.....	61
21. Diagramme en bâton de la moyenne du temps de réaction en fonction de l'exactitude des réponses et du type de stimulus présenté.....	62
22. Graphique en nuage de points de la relation entre l'âge des élèves et leur temps de réaction lors de la tâche selon le type de stimuli et l'exactitude des réponses	63
23. Diagramme en bâtons de l'exactitude des réponses des élèves aux stimuli contre-intuitifs en fonction de leur niveau scolaire.....	69

RÉSUMÉ

La recherche en didactique des sciences s'intéresse depuis longtemps au processus visant à faire évoluer les conceptions erronées intuitives des élèves : le changement conceptuel. Or, malgré les nombreuses avancées qu'ont permis les recherches dans ce domaine, les conceptions erronées des élèves persistent, particulièrement pour les concepts contre-intuitifs (Giordan, 1998). De récentes recherches pointent vers l'idée que certaines de ces conceptions ancrées pourraient provenir de l'interférence du raisonnement intuitif. De plus, la littérature a déjà établi, en mathématiques, que le fait de donner une réponse correcte allant de pair avec son intuition faisait appel à un processus de raisonnement différent de celui nécessaire pour surmonter des interférences intuitives. En effet, il semble dans ce dernier cas lié à l'activation de mécanismes d'inhibition (Stavy & Babai, 2010; Stavy, Goel, Critchley & Dolan, 2006).

Dans ce contexte, la présente étude tient compte de l'apport des neurosciences et de la psychologie cognitive dans l'étude de la capacité des élèves à surmonter leurs intuitions en sciences. Sommairement, cette recherche tente de mieux comprendre le processus de raisonnement des élèves lorsqu'ils sont face à des concepts scientifiques contre-intuitifs. Pour ce faire, une tâche informatisée présentant des stimuli intuitifs et contre-intuitifs (interférences intuitives) autour du concept de masse volumique a été construite. Cette tâche, qui a le potentiel d'être utilisée dans un appareil d'imagerie cérébrale, a été présentée à 684 élèves âgés de 8 à 14 ans. Des données comportementales (temps de réaction, exactitude des réponses) ont été recueillies, puis analysées. Ces données nous indiquent que 1) les élèves prennent plus de temps à surmonter des interférences intuitives qu'à donner des réponses qui vont de pair avec leur intuition; 2) le pourcentage de réponses correctes données aux stimuli contre-intuitifs augmente avec l'âge; 3) le temps de réaction aux stimuli contre-intuitifs réussis diminue progressivement avec l'âge. Ces résultats viennent appuyer l'idée que la maturation des mécanismes cérébraux d'inhibition aurait un rôle à jouer dans le développement de la capacité de surmonter des interférences intuitives en sciences, et laissent entendre qu'il pourrait être pertinent de développer des interventions pédagogiques ayant pour but de développer les fonctions exécutives des élèves (inhibition).

Mots clés : masse volumique, règles intuitives, inhibition, temps de réaction, science, apprentissage, fonctions exécutives, interférence intuitive, raisonnement intuitif

ABSTRACT

Over the past few decades, a major research concern in science education has been the topic of pre-instructional misconceptions concerning various phenomena that students bring to class. Recent research suggested that some students' firmly held misconceptions could stem from the interference of intuitive reasoning. Literature has also established that overcoming intuitive interferences in mathematics is different from answering correctly in line with intuition, and that it is associated with the activation of inhibitory control mechanisms (Stavy & Babai, 2010; Stavy, Goel, Critchley & Dolan, 2006).

In this context, this study takes into account the contributions of neuroscience and psychology to aim to understand students' mental processes associated with overcoming intuitive interference in science. To do so, a computerized task usable in brain imaging devices, which present intuitive and counter-intuitive stimuli related to the concept of density, was developed. Using this task, empirical data (reaction time, accuracy of responses) was collected from 684 students aged from 8 to 14, and has been analyzed. Data shows that 1) answering in line with intuition takes less time than overcoming intuitive interferences; 2) the rate of correct answers to stimuli that present intuitive interferences increases with age; 3) reaction time associated with overcoming intuitive interference decreases with age. These results supports the suggestion that the maturation of inhibitory control mechanisms plays a key role in improving student's ability to overcome intuitive interferences in science, and points to importance of enhancing students' inhibitory control mechanisms.

Key words : *density, intuitive rules, inhibition, reaction time, science, learning, executive functions, inhibitory control mechanisms, intuitive interference, intuitive reasoning*

INTRODUCTION

Au cours des dernières décennies, la problématique de l'apprentissage et de l'enseignement des sciences a intéressé de nombreux chercheurs, comme en témoigne la richesse des écrits sur le sujet. Ces études ont notamment mis en évidence les difficultés rencontrées par les élèves dans la compréhension de notions scientifiques pourtant jugées élémentaires. Le bagage d'expériences des élèves et les explications personnelles du monde qu'ils en tirent seraient en partie à l'origine de ces difficultés. En effet, il apparaît que « régulièrement, les conceptions initiales [des élèves] sont plus ou moins justes au regard des concepts scientifiques socialement reconnus par la communauté scientifique » (Bêty, 2009, p. 4) et qu'il est difficile de surmonter ces conceptions antérieures erronées.

Lors d'expériences en enseignement, je me suis retrouvée à maintes reprises face à ces conceptions erronées persistantes des élèves, ce qui m'a amenée à me questionner sur le processus visant à les faire évoluer : le changement conceptuel. Dans ce contexte, je me suis intéressée à la recherche en didactique des sciences, qui tente notamment de « mieux comprendre la nature des transformations cognitives en jeu dans l'apprentissage de notions scientifiques et les résistances qui parfois s'y opposent. » (Legendre, 2007).

Or, il semble que, malgré les nombreuses avancées qu'ont permises les recherches dans ce domaine, les conceptions erronées des élèves persistent, même avec un enseignement intensif (Chi, 2005; Duit & Treagust, 2003). C'est particulièrement le cas pour les concepts contre-intuitifs (Giordan, 1998), c'est-à-dire qui vont à l'encontre de leurs intuitions.

Toutefois, l'avènement de techniques d'imagerie cérébrale, qui permettent d'observer ce qui se passe dans le cerveau des élèves lors de l'apprentissage des sciences, apporte des éléments nouveaux dans l'étude du changement conceptuel. Cette recherche tiendra d'ailleurs compte de l'apport des neurosciences et de la psychologie dans l'étude de la capacité des élèves à surmonter leurs intuitions en sciences. Sommairement, la présente recherche tente de vérifier,

à l'aide d'un dispositif de recherche éventuellement utilisable dans un appareil d'imagerie cérébrale, le rôle de l'inhibition dans l'apprentissage de concepts contre-intuitifs en sciences.

Le présent mémoire, qui détaille le cheminement parcouru pour atteindre ce but, se divise en cinq chapitres. Dans un premier chapitre, la problématique de la recherche sera précisée afin de mieux situer le contexte et cerner les enjeux entourant la question de recherche. Le questionnement de recherche émergeant de ces réflexions, ainsi que les objectifs de recherche qui en découlent, y seront ensuite dégagés. En outre, la pertinence scientifique et sociale de la recherche y seront démontrées, de manière à justifier l'importance et la contribution de cette étude dans le contexte actuel.

Dans le deuxième chapitre, les assises théoriques de notre recherche seront présentées. Ainsi, le sens des principaux concepts impliqués dans notre recherche sera précisé. Sur cette base, la démarche méthodologique de notre étude sera abordée et justifiée dans le troisième chapitre. Il y sera question des modalités d'expérimentation et de collecte des données, des caractéristiques des sujets participants, des instruments utilisés, des étapes du déroulement de la tâche, ainsi que de considérations d'ordre éthique.

Le quatrième chapitre présente quant à lui les résultats tirés de l'analyse des données recueillies. Ces résultats y seront interprétés et discutés à la lumière d'études antérieures afin de répondre à notre question de recherche initiale.

Finalement, dans le cinquième et dernier chapitre, une synthèse des conclusions dégagées, ainsi qu'un retour sur les différentes étapes, seront effectuées. Enfin, un aperçu des limites et des retombées pédagogiques et scientifiques sera dressé, puis quelques avenues seront suggérées pour d'éventuelles recherches découlant de ce mémoire.

CHAPITRE I

PROBLÉMATIQUE

1.1 Problème de recherche

Dans le contexte mondial actuel, où la culture scientifique et technologique d'une société constitue un pilier de son progrès social et économique, les nombreuses difficultés rencontrées par les élèves dans l'apprentissage des sciences inquiètent. En effet, celles-ci ont des conséquences majeures, entre autres sur leur perception des sciences ou leur attirance pour des carrières scientifiques (George, 2006; Masnick, Valenti, Cox, & Osman, 2009). Il n'est donc pas surprenant qu'un peu partout à travers le monde, les dirigeants, les décideurs et les éducateurs soient préoccupés par les performances des élèves en sciences. Au XXI^e siècle, plusieurs organisations internationales (*International Organization for Science and Technology Education, European Commission, International Council of Associations for Science Education, etc.*) ont d'ailleurs abordé cette problématique et l'Organisation de coopération et de développement économiques en a fait l'une de ses priorités (OCDE, 2008).

Au Québec, la situation est aussi préoccupante : dans son rapport de conjoncture, le *Conseil scientifique et technologique* remarque que le « développement de la culture scientifique et technique dans la société québécoise apparaît insuffisant à l'échelle des défis actuels ». En effet, alors que le Québec fait des sciences et de la technologie un créneau stratégique de développement économique pour l'avenir, Statistique Canada, par son analyse des données du PISA, constate que les jeunes Québécois ont moins d'intérêt et moins confiance en leurs capacités à accomplir des tâches scientifiques que la moyenne des élèves canadiens (Bussière, Knighton, & Pennock, 2007).

Dans de telles circonstances, les recherches en éducation qui tentent de mieux comprendre la nature des difficultés des élèves en sciences présentent le potentiel de dégager des pistes concrètes susceptibles d'améliorer et d'informer les politiques et les pratiques éducatives, ainsi que de bonifier la formation du personnel enseignant.

1.1.1 La résistance des conceptions initiales erronées

Parmi les raisons évoquées comme étant à l'origine des difficultés des élèves en sciences, les conceptions initiales de ceux-ci figurent parmi les plus souvent pointées du doigt :

« the main barrier to learning the curricular materials [...] is not what the student lacks, but what the student has, namely, alternative conceptual frameworks for understanding the phenomena covered by the theories we are trying to teach. »
(Carey, 2000, p. 13)

En effet, en enseignement des sciences, les interventions pédagogiques se heurtent souvent aux conceptions tenaces des élèves en lien avec différents phénomènes scientifiques (Duit, 2007). Ces idées initiales des élèves sont parfois en rupture avec les savoirs scientifiques abordés en classe – la littérature les désigne alors par les termes suivants : conceptions alternatives, erronées, fausses, naïves, etc. En voici quelques exemples, tirées du livre de Thouin (2005) :

Tableau 1 : Conceptions erronées fréquentes, d'après Thouin (2005)

	Conception erronée fréquente	Conception scientifique
Biologie	<i>La chlorophylle des arbres feuillus change de couleur à l'automne.</i>	<i>La chlorophylle est toujours verte, mais elle disparaît à l'automne, et les autres pigments deviennent plus visibles.</i>
Chimie	<i>Tous les métaux sont solides, durs et brillants.</i>	<i>Le mercure, par exemple, est liquide et le potassium est très mou.</i>
Physique	<i>- Les objets légers flottent et les objets lourds coulent.</i>	<i>- La flottaison ne dépend pas du poids, mais de la densité des objets.</i>
	<i>- Les objets lourds tombent plus vite que les objets légers.</i>	<i>- Les objets légers qui opposent peu de résistance à l'air tombent avec la même accélération que les objets lourds.</i>
Astronomie	<i>Les saisons sont causées par le fait que la Terre est plus près du Soleil l'été que l'hiver.</i>	<i>C'est l'axe d'inclinaison de la Terre, et non la distance Terre-Soleil, qui explique l'alternance des saisons sur Terre.</i>

Les conceptions initiales erronées des élèves sont bien connues et ont été largement étudiées par les chercheurs en éducation. Déjà, Piaget et Bachelard avaient relevé dans leurs travaux l'existence d'un *déjà-là*, d'explications intuitives qui venaient interférer avec le processus d'apprentissage. Depuis, les chercheurs en didactique des sciences ont tenté de les décrire, de les répertorier, de déterminer leur origine et l'âge auquel elles sont fréquentes (Astolfi & Develay, 2002).

Selon les recherches, les conceptions initiales des élèves résistent très souvent aux efforts d'enseignement et perdurent parfois au-delà de toute la scolarité. Ainsi, elles consistent aujourd'hui en l'un des plus grands obstacles dans l'enseignement des sciences (Duit & Treagust, 2003) et il importe donc de se pencher sur le processus visant à les faire évoluer, généralement désigné sous le nom de changement conceptuel.

1.1.2 Limites de nos connaissances sur le changement conceptuel

Plusieurs chercheurs ont tenté d'expliquer et de conceptualiser le processus d'évolution des conceptions initiales des élèves aux conceptions scientifiques visées. Ils ont ainsi élaboré des modèles de changement conceptuel, dont les plus connus sont ceux de Posner, Strike, Hewson et Gertzog (1982), de Nussbaum et Novick (1982) et de Vosniadou (1994), qui seront détaillés dans le prochain chapitre. Alors que pour certains d'entre eux, le changement conceptuel passe par la mise en évidence des anomalies dans les conceptions erronées des élèves, d'autres croient plutôt qu'il faudrait amener les apprenants à comparer explicitement leurs conceptions avec la conception scientifique. Certains modèles de changement conceptuel préconisent plutôt le dénigrement des conceptions initiales erronées des apprenants, qui sont perçues comme des obstacles à l'apprentissage. Enfin, d'autres modèles s'intéressent davantage aux mécanismes d'élaboration des conceptions des élèves. En somme, il ne semble pas, à ce jour, exister de consensus quant au modèle de changement conceptuel qui devrait être privilégié (diSessa, 2006).

1.1.3 L'interférence des règles intuitives

Parmi les nombreux modèles de changement conceptuel apparaissant dans la littérature, Stavy et Tirosh (2000) ont proposé, puis développé (Ruth Stavy, Babai, et al., 2006) une théorie selon laquelle certaines conceptions initiales des élèves ne seraient en réalité que le résultat de la mobilisation de règles intuitives (*intuitive rules*): « *conceptions, apparently related to specific domains, are actually only specific instances of the use of [intuitive rules]* » (R. Stavy & Tirosh, 2000, p. 2). Selon ces auteurs, les élèves de tous âges obéissent à un certain nombre de règles intuitives lorsqu'ils résolvent des tâches en sciences et en

mathématiques présentant des caractéristiques externes communes. Lorsqu'on leur présente des problèmes faisant appel à ces règles, les élèves perçoivent comme évidentes leurs réponses qui vont de pair avec leur intuition, même si elles ne sont pas scientifiquement correctes et génèrent parfois des erreurs ou des difficultés d'apprentissage (Ruth Stavy, Tsamir, & Tirosh, 2002; Tirosh & Stavy, 1999).

Jusqu'à ce jour, plusieurs règles intuitives ont été identifiées par ces chercheurs, par exemple « *More A - More B* ». Cette règle suggère que, dans la vie quotidienne comme dans de nombreux problèmes scientifiques et mathématiques, les élèves sont amenés à penser que « plus il y a d'une quantité A, plus il y aura d'une quantité B ». En effet, il est fréquent que l'on doive comparer deux objets en se basant sur une quantité A, mais que celle-ci ne soit pas directement perceptible avec les sens. Il est alors possible de recourir à une autre quantité (B) pour effectuer cette comparaison. Par exemple, un individu qui doit comparer le niveau d'eau dans deux cruches identiques et opaques peut, en les soulevant, estimer leurs masses respectives. Puis, sans avoir vu le niveau d'eau, il pourra inférer que ce dernier est supérieur dans l'une des cruches, étant donné sa masse plus élevée. De manière inconsciente, cet individu vient d'appliquer la règle intuitive (ou heuristique) que Stavy et Tirosh (2000) ont baptisée « *More A-More B* ».

Généralement, les réponses générées lors de l'utilisation de règles comme celle-ci sont rationnellement correctes : non seulement les heuristiques s'avèrent « plus rapides et plus simples d'utilisation que les raisonnements méthodiques, mais ils sont aussi plus efficaces que ces derniers » (Potvin, 2007, p. 357). Il est donc légitime que l'on ait couramment recours à ces règles intuitives dans nos décisions quotidiennes, qui doivent souvent être prises rapidement sans disposer de toutes les informations nécessaires. Toutefois, dans certains contextes, l'application de ces règles intuitives mène plutôt à des réponses incorrectes. Dans ces cas, désignés comme des « interférences intuitives » par Stavy et Tirosh, les règles intuitives de l'individu viendraient plutôt interférer et nuire à son raisonnement scientifique.

La réponse correcte désirée, plus rare dans ces circonstances, est alors considérée comme contre-intuitive, puisqu'elle va à l'encontre d'une ou de plusieurs règle(s) intuitive(s). Ainsi,

en sciences, dans le contexte de nombreux apprentissages, les interférences intuitives seraient fréquentes et à l'origine de plusieurs erreurs des élèves.

1.1.4 Mécanismes cérébraux sous-tendant les règles intuitives

Afin de mieux comprendre comment aider les élèves à surmonter les interférences intuitives, Stavy et Babai (2010) ont voulu déterminer quels étaient les mécanismes cérébraux impliqués lorsqu'ils ont recours aux règles intuitives en mathématiques. Leurs résultats indiquent que les zones du cerveau activées lorsque les réponses des élèves vont de pair avec leur intuition sont différentes de celles activées lorsqu'ils doivent surmonter une interférence intuitive. Dans ce dernier cas, ce sont les régions bilatérales du cortex préfrontal qui s'activent, des régions qui sont impliquées dans des fonctions exécutives telles que le contrôle inhibitif. L'activation de ces régions cérébrales laisse supposer que l'inhibition des règles intuitives serait la clé du succès des élèves devant une interférence intuitive en mathématiques.

Stavy et Babai ne sont pas les premiers à suggérer que l'inhibition aurait un rôle à jouer dans la capacité des élèves à surmonter leurs conceptions intuitives. En effet, Houdé et ses collègues (Houdé & Guichart, 2001; Houdé, et al., 2011) ont démontré que le succès des élèves dans une tâche piagétienne impliquant des interférences sur le concept de nombre requiert aussi un processus d'inhibition.

Jusqu'à ces dernières années, aucune étude n'était venue étudier l'application de ces conclusions prometteuses dans un contexte d'apprentissage des sciences. Toutefois, récemment, le développement des neurosciences a permis de jeter un éclairage révélateur sur les processus biologiques qui sous-tendent le changement conceptuel (Masson, Potvin, Riopel, Brault Foisy, & Lafortune, 2012). En effet, de récentes recherches alliant neurosciences et éducation nous permettent aujourd'hui de mieux comprendre la façon dont le cerveau apprend de nouveaux concepts scientifiques. Ces recherches indiquent notamment que le cerveau des élèves traite parfois les stimuli qui contredisent leurs conceptions initiales comme des erreurs (Fugelsang & Dunbar, 2005; Masson, 2012; Pettito & Dunbar, 2004; Ruth Stavy & Babai, 2010; Ruth Stavy, Goel, et al., 2006). La neuroéducation vient ainsi

corroborer l'idée, soulevée par Bloom et Weisberg (2007), que les conceptions scientifiques les plus persistantes et résistantes sont celles qui sont contre-intuitives.

En outre, deux recherches récentes en neuroéducation (Dunbar, Fugelsang, & Stein, 2007; Masson, 2012) viennent étayer le rôle de l'inhibition dans l'apprentissage des sciences : elles suggèrent toutes deux que les élèves qui réussissent à surmonter leurs conceptions intuitives erronées en physique inhiberaient celles-ci. De tels résultats permettent d'envisager une nouvelle façon de concevoir le changement conceptuel : plutôt que de le voir comme une restructuration complète ou un abandon des connaissances antérieures de l'apprenant, ces recherches laissent entendre que « réaliser un changement conceptuel serait en fait apprendre à inhiber (c'est-à-dire contrôler ou désactiver) les réseaux neuronaux menant à la formulation de réponses inappropriées. » (Masson, 2012, p. 18)

1.2 Objectif de recherche

Bien que le rôle de l'inhibition dans l'apprentissage de concepts scientifiques semble de plus en plus se confirmer, beaucoup de travail reste encore à accomplir pour mieux comprendre comment les élèves parviennent à surmonter les interférences intuitives en sciences. Ainsi, même si le développement des mécanismes cérébraux liés à l'inhibition est de mieux en mieux connu, la recherche en didactique des sciences n'a pas, à ce jour, exploré le lien entre celui-ci et la capacité des élèves à surmonter des interférences intuitives.

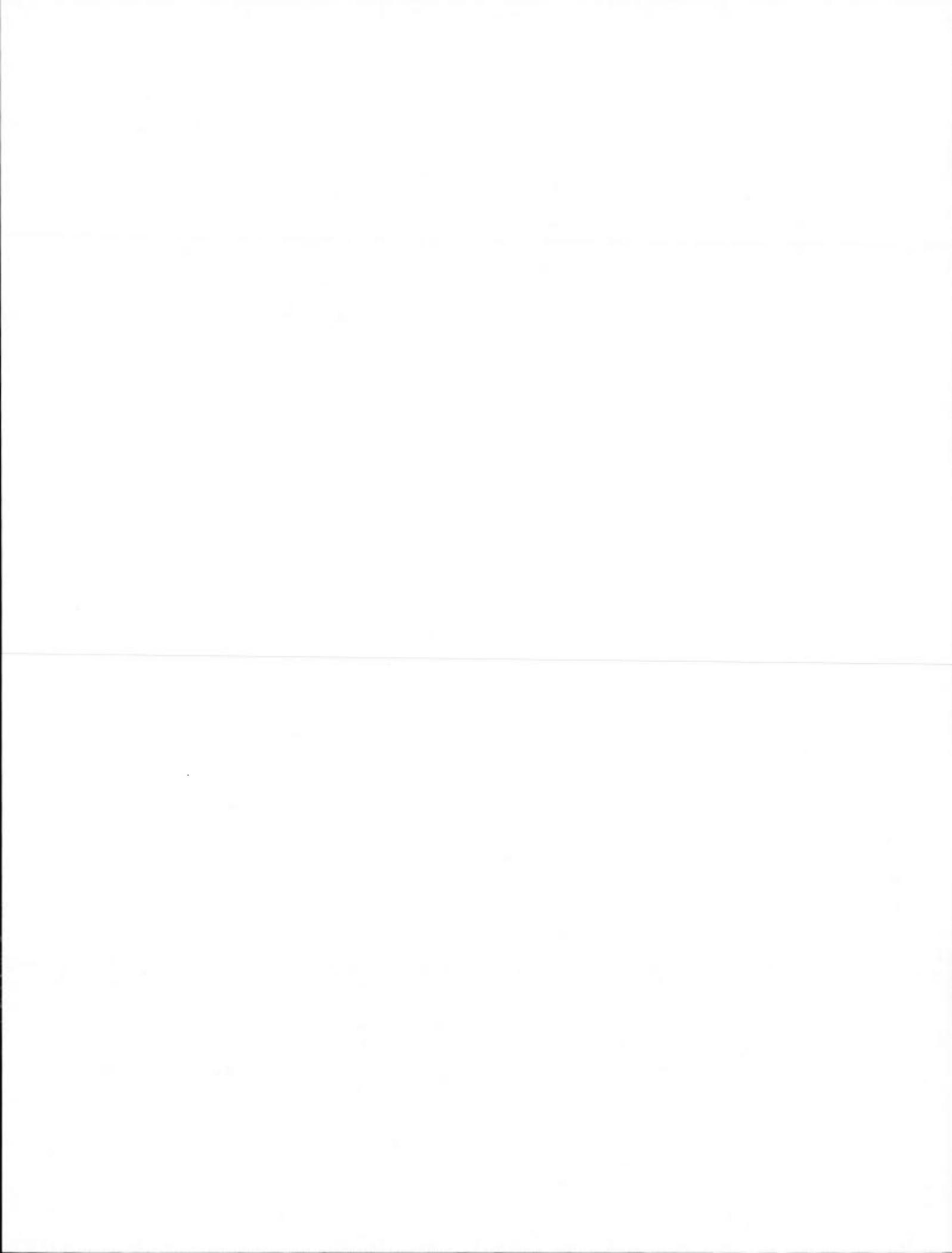
Dans ces circonstances, le présent projet, qui s'inscrit dans la continuité des recherches décrites plus haut, propose d'établir un lien entre *la capacité des élèves à surmonter des interférences intuitives en sciences et le développement de leurs mécanismes cérébraux d'inhibition.*

1.3 Pertinence sociale et scientifique de la recherche

Les conclusions de la présente recherche pourraient non seulement élargir le champ d'application des études décrites plus haut, mais également confirmer le lien qui semble se

dessiner entre l'inhibition et l'apprentissage des sciences. En effet, cette étude permettra de mieux comprendre le rôle de l'inhibition dans l'apprentissage des sciences et le processus de raisonnement des élèves devant des interférences intuitives, ce qui pourra possiblement aider les enseignants de sciences à mieux orienter leurs pratiques éducatives.

Bref, le projet proposé, en permettant à la communauté éducative de jeter un regard nouveau sur le rôle de l'inhibition dans l'apprentissage des sciences, présente le potentiel de soutenir une perspective nouvelle de la construction de connaissances scientifiques.



CHAPITRE II

CADRE THÉORIQUE

Dans ce chapitre, le cadre théorique venant éclairer les principaux concepts qui se rattachent à notre projet de recherche sera présenté. Dans un premier temps, le processus de production des biais du raisonnement sera développé. Quelques modèles de changement conceptuel, qui tentent d'expliquer et de rendre compte de l'élaboration des conceptions erronées des apprenants en science, seront ensuite discutés. Puis, les mécanismes cérébraux qui sous-tendent la capacité des élèves à surmonter leurs conceptions erronées seront décrits. Enfin, le lien entre la capacité à surmonter des interférences intuitives et le temps que les apprenants prennent pour ce faire sera également explicité. En dernier lieu, les hypothèses de recherche découlant de ce cadre théorique seront spécifiées.

I think, therefore I err.
(Gigerenzer, 2005)

2.1 Les biais du raisonnement

Depuis plusieurs siècles, les mécanismes de production et d'acquisition des connaissances suscitent maints questionnements et ne cessent d'alimenter les débats épistémologiques et philosophiques (ex. : Aristote vs Platon, Locke vs Descartes, etc.). Au fil des ans, ces processus ont fait l'objet de plusieurs recherches, particulièrement en psychologie cognitive, en épistémologie et en éducation. Notamment, les chercheurs ont observé qu'il existe des principes de raisonnement inductif communs à presque toutes les sociétés historiques et étant utilisés dans des contextes et des disciplines très variés (Carruthers, Stich, & Siegal, 2002). Ainsi, la grande majorité des individus, qu'ils soient scientifiques ou membres d'un groupe de cueilleurs-chasseurs, posséderait la capacité d'induire des théories ou des lois à partir d'un petit nombre d'expériences personnelles, puis d'appliquer ces règles acquises dans des contextes variés à une situation spécifique donnée. Les bébés âgés de neuf mois seraient déjà en mesure de former de telles inductions (*overhypotheses*) lorsqu'on leur fournit quelques données (Dewar & Xu, 2010). Ainsi, les mécanismes d'induction permettent aux apprenants

de tous âges d'acquérir des connaissances qui vont au-delà des limites de leurs expériences directes dans des champs variés du savoir (exemple : Carey & Bartlett, 1978). Cette habileté d'inférence inductive unique et extraordinaire de l'être humain est donc essentielle au développement du savoir humain.

Selon cette perspective, ce n'est pas tant les expériences d'un individu qui sont à l'origine de ses connaissances (*evidence-based knowledge*), que les mécanismes d'induction décrits plus haut. Ces processus d'inférence inductive, bien que parfois conscients, s'opérationnalisent la plupart du temps de manière inconsciente; ils mènent alors à des apprentissages dits implicites, que Dewar et Xu (2010) définissent ainsi :

« Implicit learning is the process through which one becomes sensitive to certain regularities in the environment: (1) without trying to learn regularities, (2) without knowing that one is learning regularities, and (3) in such a way that the resulting knowledge is unconscious. »

Bref, les puissants mécanismes d'induction de l'être humain lui permettraient, souvent de manière intuitive ou inconsciente, de se construire des règles mentales personnelles (ou *heuristiques*) qui l'aideront ultérieurement à répondre à un certain nombre de tâches de jugement et d'évaluation.

Toutefois, le processus de raisonnement inverse, c'est-à-dire être en mesure de contextualiser l'information, est de loin plus ardu : il appert en effet que l'humain s'appuie à outrance sur ses règles mentales intuitives lors de la prise de décision, de sorte que son raisonnement est bien souvent biaisé par ces inférences (Evans, 2006; Kemp, Perfors, & Tenenbaum, 2007; Mercier & Sperber, 2008; Uleman, Kressel, & Rim, 2011). Contrairement aux erreurs aléatoires, ces biais sont « systématiques et obéissent à des déterminismes qui ne doivent rien au hasard » (Cadet & Chasseigne, 2009, p. 186). L'intérêt des chercheurs en psychologie cognitive pour ces biais du raisonnement date de plusieurs décennies (Evans, Barston, & Pollard, 1983; Tversky & Kahneman, 1974). Depuis, ce domaine de recherche est toujours aussi activement alimenté, et des centaines de recherches sont venues confirmer, à répétition, qu'une grande majorité d'individus commettent de tels biais (ou erreurs) dans des tâches de raisonnement variées.

Jusqu'à tout récemment, la nature de ces biais était toutefois méconnue, les chercheurs étant partagés autour de la question suivante : l'être humain détecte-t-il qu'il est biaisé? Toutefois, de récentes études (De Neys, 2010; De Neys, Vartanian, & Goel, 2008) ont démontré que les individus s'aperçoivent, lors d'interférences de leurs règles mentales, que leurs réponses intuitives ne sont pas toujours pleinement justifiées, même s'ils n'arrivent pas à bloquer celles-ci.

« People do notice that the intuitive response conflicts with more normative considerations. The problem, however, is that despite this knowledge they will not always manage to inhibit and discard the tempting intuitive beliefs. » (De Neys, Cromheeke, & Osman, 2011, p. 1)

Ainsi, les réponses intuitives erronées (ou biais du raisonnement) semblent attribuables à la défaillance de mécanismes d'inhibition, ce que plusieurs études, décrites à la section 2.4 de ce chapitre, sont venues confirmer.

Si les concepts d'inhibition et d'interférence sont bien connus en psychologie, « ni l'un ni l'autre de ces concepts n'ont été appliqués d'une façon pertinente pour le domaine éducatif. » (Dempster & Corkill, 1999, p. 2, traduction libre). Pourtant, certains chercheurs (Dempster & Brainerd, 1995; Dempster & Corkill, 1999) suggèrent que l'interférence des heuristiques et l'inhibition pourraient jouer un rôle important dans le processus d'apprentissage et d'enseignement. Par exemple, dans le problème mathématique suivant, le fait que certains élèves n'arrivent pas à inhiber l'heuristique « 3 fois plus = multiplier par 3 » pourrait être à l'origine de la réponse incorrecte (45) qu'ils donnent.

Un cycliste se rend à la station de train en 15 minutes. Un automobiliste y parvient 3 fois plus rapidement. Combien de temps ce dernier prend-il pour se rendre à la station?

Bref, même si les implications des biais du raisonnement en éducation ont été peu explorées à ce jour, de nombreux parallèles peuvent être dressés entre ceux-ci et les difficultés ou les erreurs systématiques des élèves en classe étudiés à ce jour, notamment en sciences.

2.2 Les conceptions erronées en sciences

Les chercheurs en didactique des sciences se sont eux aussi penchés sur les théories intuitives des élèves qui viennent biaiser leur raisonnement scientifique : un bref tour de la littérature nous permet rapidement de prendre conscience qu'elles sont un enjeu crucial dans l'enseignement des sciences. En effet, depuis les trente dernières années, de nombreuses études (par exemple : Carey, 1985; Piaget & Cook, 1952; Vosniadou & Brewer, 1987) sont venues démontrer que les élèves entretiennent, avant même leurs premiers cours de sciences, plusieurs conceptions intuitives qui entrent en contradiction avec les notions scientifiques à enseigner. Ces conceptions initiales des élèves, fréquentes et persistantes (avant, durant et après l'enseignement), constituent de véritables obstacles à l'apprentissage des sciences.

Au cours des dernières décennies, les recherches en éducation ont tenté de répertorier (Duit, 2007; Thouin, 2005) et caractériser ces conceptions initiales des élèves dans de nombreuses disciplines (voir la méta-analyse de Murphy & Alexandre, 2008). Au fil des recherches, ces dernières ont hérité de différentes dénominations et définitions, que Murphy et Alexander ont synthétisées dans le tableau reproduit ci-dessous.

Tableau 2 : Définitions issues de la méta-analyse de Murphy et Alexandre (traduction libre)
(Murphy & Alexandre, 2008, pp. 606-607)

<i>Erroneous or intuitive belief</i>	Préconceptions ou vues non scientifiques, dont certaines sont profondément enracinées, qui se basent sur une conception erronée (<i>misconception</i>).
<i>Intuitive/alternative/preinstructional conceptions, preconceptions</i>	Compréhension élaborée à la suite d'une interaction de l'apprenant avec son environnement; influence la manière dont il interprète et construit de nouvelles conceptions.
<i>Misconception</i>	Compréhension, conception ou croyance de l'apprenant qui diffère de la conception scientifique.
<i>Prior/naive knowledge</i>	Connaissances que les apprenants détiennent lorsqu'ils font leur entrée dans un environnement d'apprentissage donné, et qui sont potentiellement pertinentes pour la construction de nouvelles connaissances.

Afin de mieux expliquer et rendre compte de la difficulté des élèves à faire évoluer leurs conceptions initiales, plusieurs chercheurs ont tenté d'élaborer des modèles de changement conceptuel. Or, étant donné le peu de clarté conceptuelle autour de la définition même d'une conception, il est normal qu'ils conçoivent différemment la façon de les faire évoluer. Ainsi,

malgré certaines origines théoriques communes, aucun modèle ne fait consensus à ce jour (diSessa, 2006). Néanmoins, un bref tour d'horizon des modèles de changement conceptuel les plus connus et cités sera présenté ci-dessous.

2.2.1 Le modèle de Nussbaum et Novick

Le modèle proposé par Nussbaum et Novick (1982) s'inspire notamment des travaux de l'historien des sciences Thomas Kuhn, qui sont à l'origine du champ de recherche autour du changement conceptuel. Kuhn y traite du progrès de la connaissance scientifique, qu'il voit comme discontinu et procédant par révolutions. Selon lui, un changement de paradigme dans la communauté scientifique résulterait d'un déséquilibre ou d'un conflit issu de la prise en considération d'anomalies dans le paradigme initial. Par exemple, lorsque des observations astronomiques vinrent mettre en doute, au XVI^e siècle, la validité du paradigme géocentrique du système solaire de Ptolémée, la communauté scientifique est entrée dans un état de crise avant d'accepter le nouveau paradigme héliocentrique proposé par Copernic.

Selon Nussbaum et Novick, c'est ce même état de déséquilibre qui permettra aux individus de faire évoluer leurs conceptions personnelles. En effet, ces auteurs laissent entendre que le passage des conceptions initiales aux conceptions scientifiques se produit dans un processus d'accommodation; l'élève doit passer par une phase de déséquilibre (conflit cognitif) durant laquelle il va ressentir le besoin de changer de conception. Ce conflit cognitif sera causé par la mise en évidence d'anomalies, par des discussions ou des démonstrations, dans la conception naïve.

2.2.2 Le modèle de Posner, Strike, Hewson et Gertzog

Tout comme Nussbaum et Novick, Posner et son équipe (Posner, et al., 1982) s'appuient aussi sur les travaux de Piaget et de Kuhn et envisagent également le changement conceptuel comme un remplacement des conceptions. Leur modèle, qui est aujourd'hui l'un des plus cités, propose que les élèves maintiennent leurs idées initiales, à moins qu'ils aient de bonnes raisons de les abandonner. Selon ces auteurs, quatre conditions doivent être remplies pour qu'un remplacement des conceptions (ou accommodation) ait lieu : 1) il doit y avoir

insatisfaction par rapport à la conception en place, 2) la nouvelle conception doit être intelligible, (3) elle doit être plausible, et 4) elle doit être fertile, c'est-à-dire qu'elle doit apporter de nouvelles explications à des problèmes. Ainsi, le processus d'accommodation peut être vu comme une compétition entre les conceptions. Enfin, de manière à favoriser l'insatisfaction des apprenants par rapport à leurs conceptions initiales, il est nécessaire, selon Posner et ses collègues, de proposer aux élèves des problèmes qui soulignent les anomalies dans celles-ci.

2.2.3 Le modèle de Giordan et de Vecchi

Posner et al. ainsi que Giordan (1987) s'entendent quant à l'emploi du conflit cognitif comme moyen de provoquer un changement conceptuel. Toutefois, alors que le conflit cognitif résulte, dans le modèle de Posner et al., de l'insatisfaction de l'élève par rapport aux conceptions qu'il détient, le modèle allostérique de Giordan met davantage l'accent sur la confrontation de celles-ci. Selon la position allostérique, il faut amener les élèves, via la confrontation et la perturbation, à identifier les incertitudes et les limites de leurs conceptions. Ces dernières sont des organisations flexibles et évolutives qu'il faut bien connaître pour faire évoluer. Ainsi, pour appréhender les nouvelles connaissances, les élèves doivent mobiliser leurs savoirs et les articuler en réseau autour de concepts organisateurs.

2.2.4 Le modèle de Vosniadou

Contrairement aux trois modèles présentés jusqu'ici, qui voient le changement conceptuel comme un remplacement des conceptions initiales, Vosniadou (1994) envisage celui-ci comme une révision qui s'opère au niveau des théories et cadres spécifiques. En effet, selon cette auteure, les préconceptions sont intégrées dans une structure théorique plus grande formant un cadre théorique naïf. Ce cadre théorique préexistant chez l'apprenant ne sera que difficilement remis en cause par l'élève. Lorsque les connaissances reçues par l'expérience ou l'instruction entrent en conflit avec ce cadre de l'apprenant, celui-ci tentera tout de même d'assimiler l'information, de manière à ce qu'elle soit compatible avec le cadre théorique général. Pour résoudre graduellement le déséquilibre occasionné par de telles constructions incohérentes, une révision des connaissances antérieures devra être effectuée.

2.2.5 Le modèle de diSessa

Les modèles de Vosniadou et de diSessa (1993) s'opposent quant à l'origine des réponses non scientifiques formulées par les élèves. Selon diSessa, celles-ci ne découleraient pas de théories naïves, mais plutôt de l'utilisation inadéquate de relations causales intuitives : les primitives phénoménologiques (*p-prims*). Ces raisonnements causaux proviennent souvent d'interprétations superficielles de la réalité et sont perçus comme évidents, d'où leur appellation. Les *p-prims* (comme les heuristiques) sont nombreuses, applicables à différents contextes et contiennent souvent un fond scientifiquement juste. Conséquemment, diSessa admet l'importance des idées intuitives des élèves et, plutôt que de les remplacer, elle suggère d'amener les apprenants à les structurer autrement. Son modèle de changement conceptuel s'oppose donc au conflit cognitif.

Ce modèle propose également qu'au cours du changement conceptuel, l'apprenant développe progressivement des *classes de coordination* (systèmes complexes de connaissances) conformes aux savoirs scientifiques, de sorte que la priorité des *p-prims* et leurs contextes d'activation change. Ainsi, le changement conceptuel, selon diSessa, constitue un travail complexe d'intégration, au sein d'une *classe de coordination*, des bribes d'intuition éparses qui la constituent.

2.2.6 Le modèle de Stavy et Tirosh

Plus récemment, Stavy et Tirosh (2000) ont eux aussi proposé un modèle de changement conceptuel qui admet l'importance des idées initiales alternatives des apprenants. Comme d'autres l'ont suggéré avant eux, ces chercheurs croient que les heuristiques des élèves seraient à l'origine de la plupart de leurs réponses incorrectes à des tâches en sciences et en mathématiques.

Toutefois, Stavy et Tirosh constatent en outre que les élèves réagissent de la même façon à de nombreuses tâches qui ne sont pas liées conceptuellement. En se basant sur cette observation, ils proposent une théorie qui explique et prédit les réponses des apprenants à plusieurs tâches scientifiques et mathématiques : la théorie des « règles intuitives ». Cette théorie avance que

la grande majorité des conceptions initiales des élèves ne serait que le résultat de la mobilisation de règles intuitives. Ces règles posséderaient les caractéristiques du raisonnement intuitif tel que décrit par Fischbein (1987), d'où leur appellation :

« They are self-evident (subjects perceived their statements on the basis of these rules as true without a need for any further justification), and they are used with great confidence and perseverance (they often persist in spite of formal learning). Moreover, these rules have attributes of globality (subjects tend to apply them to all objects) and coerciveness (responses seem absolute to the individual and alternatives are excluded as unacceptable). » (Tirosh, Stavy, & Cohen, 1998, p. 1258)

Il semble que ces règles intuitives soient aussi universelles, c'est-à-dire qu'elles ne sont pas le produit de certaines cultures ou systèmes éducatifs, mais bien une caractéristique commune au processus de raisonnement humain. En effet, une étude (Ruth Stavy, Babai, et al., 2006) menée en Australie (auprès d'enfants aborigènes), à Taiwan et en Israël indique que devant quatre tâches différentes, les élèves donnent tous des réponses qui vont de pair avec une règle intuitive, peu importe leur provenance. Cette tendance semble diminuer avec l'âge dans les trois populations, bien qu'il existe des différences en ce qui concerne le taux de changement.

À ce jour, quelques règles intuitives ont été définies par Stavy et Tirosh, par exemple « *same A- same B* », « *more A-more B* », « *everything can be divided endlessly* » et « *everything comes to an end* ». La plupart du temps, la mobilisation de ces règles mène à un raisonnement scientifiquement correct. Cependant, elles interfèrent parfois avec celui-ci. De nombreuses études sont venues illustrer ces cas d'interférences intuitives, comme il est possible de le constater dans le tableau suivant.

Tableau 3 : Exemples d'application de la règle intuitive « *more A-more B* »

Nom et description de la règle intuitive	Exemples d'application de la règle menant à des réponses incorrectes
<p data-bbox="225 1604 453 1654">more A –more B</p> <p data-bbox="225 1665 453 1797">Deux objets (ou systèmes) qui diffèrent ou se ressemblent à propos d'une quantité A (A_1 vs A_2) sont décrits.</p>	<p data-bbox="485 1587 1260 1696">Lorsqu'on présente deux tasses d'eau chaude aux élèves, dont l'une contient deux fois plus de liquide que l'autre, ils obéissent à la règle '<i>the more water – the warmer</i>'. (Brook, Briggs, Bell and Driver 1984; Erickson 1979; Erickson and Tiberghien, 1985; Stavy and Berkobitz 1980)</p> <p data-bbox="485 1696 1260 1806">Lorsqu'on présente deux angles identiques aux élèves, dont l'un a les « bras plus long que l'autre, ils croient que ce dernier est plus grand. (<i>the longer- the bigger</i>)</p> <div data-bbox="1082 1738 1225 1789" style="text-align: right;"> </div> <p data-bbox="485 1780 884 1806">Noss (1987); Foxman and Ruddock (1984)</p>

<p>Les élèves doivent comparer ces objets en se basant sur une autre quantité B (B_1 vs B_2). Or, ils ont tendance à se fier sur la première quantité pour comparer la seconde. Ainsi, ils diront que $B_1 > B_2$ si $A_1 > A_2$.</p>	<p>Lorsqu'on présente aux élèves deux figures géométriques et qu'on leur demande de comparer les périmètres de celles-ci, plus de 70% des réponses des élèves sont incorrectes et répondent à la règle « plus l'aire de la figure est grande, plus son périmètre le sera ». <i>Babai, Levyadun, Stavy et Tirosh (2006)</i></p> <p>On présente aux élèves deux boîtes d'allumettes identiques, l'une remplie de sable et l'autre vide. Elles sont toutes les deux à la même hauteur du sol. Lorsqu'on demande aux élèves (incluant des étudiants en physique) laquelle des deux touchera le sol en premier, plusieurs répondent que c'est la boîte remplie (alors que les deux touchent le sol en même temps, selon les lois newtoniennes). Ces élèves obéissent à la loi 'the heavier- the faster'. <i>Champagne, Klopfer, & Anderson, 1979</i></p>
--	---

Les réponses similaires obtenues pour les différentes tâches décrites dans le tableau ci-dessus suggèrent, selon Stavy et Tirosh, que le même raisonnement intuitif, chez les jeunes comme les adultes, serait à l'origine d'inférences erronées en sciences et dans de nombreuses disciplines. Bref, ces chercheurs avancent que la mobilisation de règles intuitives expliquerait et prédirait de nombreuses erreurs des élèves dans plusieurs contextes.

2.2.7 Catégorisation et synthèse des modèles de changement conceptuel

Comme il a été permis de le constater dans la section 2.2, les chercheurs ont élaboré, au cours des dernières années, des interprétations très variées du processus de changement conceptuel, qui vont de l'enrichissement des préconceptions à la véritable conversion de celles-ci. Legendre (2002) propose de catégoriser ces différentes approches selon deux grandes perspectives : la perspective de rupture et celle de continuité.

Selon elle, les chercheurs qui s'inscrivent dans la première perspective insistent davantage sur la discontinuité entre les conceptions initiales et scientifiques des apprenants; ces deux dernières sont irréconciliables et les premières consisteraient en un obstacle pour acquérir les secondes. Quant à la deuxième perspective, elle s'intéresse davantage « au processus de raisonnement sous-jacent à l'élaboration des concepts et [met] l'accent sur l'existence d'éléments de connaissance communs à la pensée intuitive et à la pensée scientifique, ou encore au novice et à l'expert. » (Legendre, 2002, p. 185).

Cette catégorisation de Legendre met en lumière les divergences fondamentales qui existent entre les différents modèles de changement conceptuel, notamment quant à la structure et la fonction des connaissances antérieures des élèves. Bref, à ce jour, aucun modèle n'explique

de façon entièrement satisfaisante pourquoi les conceptions des élèves sont si difficiles à faire évoluer.

2.3 Mécanismes cérébraux liés au changement conceptuel en sciences

Malgré le nombre de modèles de changement conceptuel proposés par les chercheurs, de même que l'importance de la recherche sur le sujet, les processus mentaux liés à l'évolution des conceptions initiales des élèves demeurent encore mal connus. Or, l'utilisation de techniques d'imagerie cérébrale semble, selon Masson (2012), ouvrir la voie à de nouvelles façons de concevoir les processus de changement conceptuel.

En effet, le développement des connaissances en neuroscience, combiné avec l'avènement de techniques d'imagerie cérébrale précises, permet aujourd'hui d'approfondir la compréhension des processus biologiques qui sous-tendent le changement conceptuel. Au cours des dernières années, les projets de recherche en *neurodidactique des sciences*, « un domaine de recherche de la neurodidactique (et donc de la neuroéducation) qui étudie les mécanismes cérébraux liés à l'apprentissage et à l'enseignement des sciences » (Masson, 2007, p. 313), se sont multipliés, générant ainsi des résultats prometteurs pour l'étude du changement conceptuel. Deux études particulièrement intéressantes à cet égard seront présentées ci-dessous.

2.3.1 L'étude de Dunbar, Fugelsang et Stein en mécanique

À l'Université de Toronto Scarborough, Kevin N. Dunbar et son équipe de recherche (2007) se sont récemment penchés sur l'apprentissage de concepts scientifiques reconnus comme étant difficiles en raison des idées préalables difficilement modifiables que possèdent les élèves. Quels mécanismes cérébraux ou interventions éducatives, se demandent-ils, permettraient de surmonter ces conceptions spontanées afin de réaliser un changement conceptuel ?

Pour répondre à cette question, Dunbar, Fugelsang et Stein ont comparé, avec l'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle (IRMf), l'activité cérébrale d'experts et de novices en physique. Durant la tâche, les participants devaient déterminer si des vidéos de balles qui

tombent, dont la vitesse et la grosseur variaient, étaient exacts ou inexacts, c'est-à-dire conformes ou non aux lois du mouvement de Newton.

Lorsqu'on leur présentait des films newtoniens où les balles tombent à la même vitesse peu importe leur masse, le cortex cingulaire antérieur des novices s'activait. Puisque cette région cérébrale est liée à la détection de conflit (Botvinick, Cohen, & Carter, 2004), de tels résultats suggèrent donc que le cerveau des novices traite les films newtoniens comme des erreurs. Par contre, lorsqu'on présente à ces mêmes novices des films naïfs où les balles plus lourdes tombent plus rapidement, ils n'activent pas leur cortex cingulaire antérieur, mais plutôt leur cortex frontal médial, une région associée à l'existence de pré-représentations selon l'équipe de Dunbar.

Chez les experts à qui l'on présente des films scientifiques, on remarque une activation du cortex frontal médial. Ce résultat semble démontrer que les experts en sciences ont développé une représentation scientifiquement correcte en lien avec cette situation : les balles tombent à la même vitesse, indépendamment de leur masse. Lorsqu'on leur présente des films naïfs, comme on pouvait s'y attendre, les experts activent leur cortex cingulaire antérieur, ce qui signifie qu'ils détectent que ces films sont incorrects.

Or, Dunbar et ses collègues notent que des régions cérébrales liées à l'inhibition sont elles aussi sollicitées chez les experts confrontés à des films naïfs. Selon l'équipe de Dunbar, ces résultats pourraient signifier que les experts, plutôt que d'abandonner ou de restructurer fondamentalement leurs connaissances, auraient plutôt appris à inhiber leurs réponses spontanées issues de leurs idées préalables. Bref, selon cette étude, l'expertise en physique lors de tâches en mécanique serait liée à l'activation du cortex cingulaire antérieur et du cortex frontal médial. En d'autres termes, la capacité à inhiber les fausses conceptions jouerait un rôle clé dans les compétences des élèves en mécanique.

2.3.2 L'étude de Masson en électricité

Steve Masson (2012) a également utilisé l'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle dans le but d'étudier les mécanismes cérébraux liés aux processus de changement conceptuel.

Alors que la recherche de Dunbar étudiait les conceptions des élèves en mécanique, celle de Masson se concentre sur une conception répandue des élèves en électricité, selon laquelle un seul fil est suffisant pour allumer une ampoule.

Dans le cadre de cette recherche, deux groupes d'étudiants universitaires ont répondu à des questions liées aux circuits électriques simples dans un appareil d'IRMf. Le premier groupe était formé d'étudiants novices en sciences (c'est-à-dire n'ayant aucune formation scientifique de niveau collégial ou universitaire), alors que le second était constitué d'experts (étudiants au baccalauréat en physique). La tâche cognitive informatisée qui leur était proposée était la suivante : les participants devaient appuyer sur un bouton pour dire si le circuit électrique qui leur était présenté était conforme ou non aux lois physiques. Certains des circuits électriques présentés étaient naïfs (c'est-à-dire non-scientifiques), tandis que les autres étaient conformes aux lois scientifiques. Les activations cérébrales des sujets ont été enregistrées pour chacune de ces conditions.

Les résultats obtenus démontrent que « en règle générale, les activations cérébrales sont plus importantes chez les experts que chez les novices, en particulier lors de la présentation de circuits naïfs » (Masson, 2012, p. 78) En effet, alors que peu de différences d'activations cérébrales ont été observées entre les experts et les novices à qui l'on a présenté des circuits scientifiques, plusieurs régions du lobe frontal des experts (notamment le cortex préfrontal et le cortex cingulaire antérieur) sont significativement plus mobilisées lorsque ces derniers sont devant des circuits naïfs. Or, étant donné que ces régions du cerveau sont généralement associées à l'inhibition, de tels résultats suggèrent que les experts en sciences doivent inhiber leurs conceptions inappropriées en électricité pour arriver à évaluer correctement les circuits naïfs.

2.4 Le rôle de l'inhibition dans la capacité de surmonter des interférences intuitives

Les deux expériences dont il est question dans la section précédente suggèrent que la capacité des élèves à surmonter leurs conceptions erronées en sciences dépendrait de leur faculté à inhiber celles-ci. Ainsi, il semble que les mécanismes d'inhibition aient un rôle important à jouer dans l'apprentissage des sciences et il importe donc de s'y attarder. Or,

l'inhibition est un concept complexe, étudié depuis des années en psychologie, qu'il faut d'abord préciser. Elle peut être définie comme l'habileté à surmonter ou à résister aux interférences : « Response inhibition comes into play when prepotent, overlearned, or ongoing responses have to be suppressed in favor of executing an alternative response » (van den Wildenberg & Crone, 2005, p. 23). Burle et ses collègues (2004) proposent une définition similaire de l'inhibition: « the mechanism or set of processes that result in the containment of prepotent behavioral responses when such actions are reflex-like, premature, inappropriate, or incorrect ». Au cours des dernières années, plusieurs recherches, qui seront détaillées dans les prochaines sections de ce cadre théorique, ont tenté de mieux comprendre et expliquer le développement de la capacité à inhiber.

2.4.1 Développement des connaissances autour de l'inhibition

Dès le début du XX^e siècle, l'inhibition est déjà reconnue pour jouer un rôle central dans le raisonnement et le comportement humain (voir par exemple Sherrington, 1906; Taylor, 1931-2). Wundt (1904) suggère même que parmi les deux processus qui sont nécessaires pour la cognition (la *facilitation* et l'*inhibition*), l'inhibition est le plus important des deux. Toutefois, au cours des décennies suivantes, avec le déclin des théories classiques de la psychologie, le concept d'inhibition disparaît de la plupart des écrits dans ce domaine. L'inhibition était alors associée à des expériences classiques (ex : l'inhibition conditionnée de Pavlov) qui se déroulent la plupart du temps dans des conditions relativement artificielles.

Cependant, dans les années soixante, les avancées permises par des recherches sur le cerveau, (notamment l'étude des lésions cérébrales) engendrent un regain d'intérêt des chercheurs pour l'inhibition. Ainsi, dans les années qui suivent, plusieurs études vont suggérer que les mécanismes d'inhibition jouent un rôle dans de nombreux phénomènes psychologiques (par exemple l'attention, le raisonnement ou l'hyperactivité). Les chercheurs tentent également de mieux comprendre, en utilisant ou en développant des tâches en psychologie, comment les individus résistent aux interférences de stimuli ou d'associations inappropriés. Notamment, on s'aperçoit que de nombreuses personnes qui présentent des dommages aux lobes frontaux (voir Figure 1) ont de la difficulté à inhiber leurs réponses spontanées. Par exemple, les

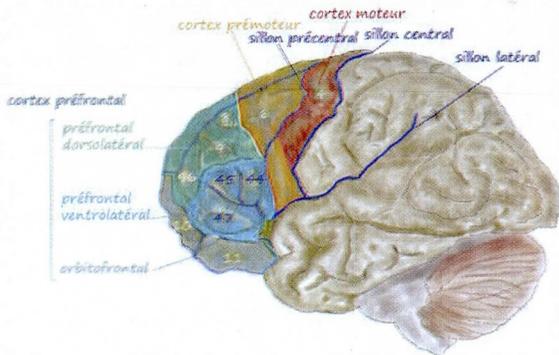


Figure 1: Vue latérale du cortex frontal

Occupant la partie antérieure du cerveau humain, le cortex frontal est divisé en trois régions : le cortex primaire moteur, le cortex prémoteur et le cortex préfrontal. Au sein de ce dernier, on distingue :

- 1- le cortex préfrontal dorsolatéral;
- 2- le cortex préfrontal ventrolatéral;
- 3- le cortex frontal inférieur (dont le cortex orbitofrontal);
- 4- le cortex médial et cingulaire antérieur (n'apparaît pas ici, étant donné que c'est une vue latérale).

individus avec des lésions au lobe préfrontal, particulièrement au cortex dorsolatéral, performant moins bien à une tâche impliquant de surmonter des interférences : le Wisconsin Card Sorting Test (WCST) (exemple : Milner, 1963). Dans ce test, on présente au sujet 4 cartes qui diffèrent de par leur couleur (rouge, vert, bleu ou jaune), de par la forme des items présentés sur chaque carte (carrés, étoiles, triangles ou croix) et de par le nombre (1-4) de ces items. Le sujet doit alors catégoriser les cartes restantes, une à une, en les posant sur l'un des 4 tas (figure 2) Aucun critère ne lui est donné pour organiser ces cartes : il peut les classer à sa guise par couleur, forme ou nombre de formes. On lui signifie uniquement que le critère choisi est le bon ou non (si ce n'est pas le bon, le sujet doit réorganiser ses cartes). À partir d'un certain moment, l'examineur peut changer de critère sans alerter le sujet. Celui-ci doit alors ajuster sa classification en conséquence, ce qui permet de voir s'il est capable d'inhiber une réponse devenue routinière.

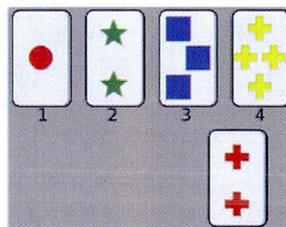


Figure 2 : Exemple de stimuli dans le Wisconsin Card Sorting Test

Si le critère de classification est la couleur,
le sujet doit placer sa carte sur le tas #1.

La tâche de Stroop (Stroop, 1935) permet elle aussi de mesurer l'inhibition. Dans un premier temps, le sujet doit nommer la couleur de rectangles colorés, puis lire des noms de couleurs imprimés avec de l'encre noire. Dans un deuxième temps, on insère une interférence : le participant doit arriver à nommer la couleur de l'encre avec laquelle les mots sont écrits et inhiber la lecture de ceux-ci (voir Figure 3).

BLEU JAUNE BLEU ROUGE BLEU

Figure 3: Exemple de stimuli dans la tâche de Stroop
Ici, les sujets doivent réussir à nommer la couleur de l'encre, soit vert, bleu, jaune, vert, rouge

Bien que la plupart des sujets ont de la difficulté à surmonter les interférences au cours de cette tâche, ceux qui ont des lésions au cortex préfrontal performant moins bien et nomment le nom du mot plutôt que la couleur de l'encre (exemple : Benson, et al., 1981). Bref, le cortex préfrontal semble jouer un rôle majeur dans la capacité à surmonter ou à inhiber des réponses inappropriées.

2.4.1 Régions cérébrales liées à l'inhibition

Plus récemment, le développement des techniques d'imagerie cérébrale a permis d'identifier avec davantage de précision les régions cérébrales liées à l'inhibition de réponses spontanées. En effet, grâce à ces avancées, il est désormais possible d'obtenir des images de cerveaux non pathologiques, de sorte que le recours à l'étude des lésions cérébrales s'en trouve grandement diminué. Ainsi, au cours des deux dernières décennies, plusieurs études neuroscientifiques ont tenté d'associer les performances d'individus lors de tâches cognitives qui impliquaient des interférences aux régions cérébrales activées chez eux. Dans le cadre de ces recherches, les participants devaient généralement, dans des appareils d'imagerie cérébrale, répondre à des tâches d'inhibition développées en psychologie. Celles-ci comportaient habituellement deux types de questions : des questions simples et des questions plus difficiles qui impliquent de surmonter une réponse spontanée.

Par exemple, les chercheurs Nathaniel-James, Fletcher et Frith (1997) ont repris la tâche de Hayling en utilisant la tomographie par émission de positron (PET). Les participants à cette étude devaient compléter des phrases pour lesquelles le dernier mot était manquant (par exemple, « The captain wanted to stay with the sinking _____ »). Dans un deuxième temps, ils devaient compléter les phrases avec un mot qui ne faisait pas de sens, ce qui impliquait qu'ils devaient inhiber le mot qui leur venait spontanément à l'esprit. (par exemple, « The

captain wanted to stay with the sinking APPLE). Dans cette deuxième condition, le cortex frontal inférieur et le cortex cingulaire antérieur des sujets étaient plus activés.

Bush et al. (1998) ont aussi utilisé une variante de tâche connue en psychologie, la tâche de Stroop, pour étudier l'inhibition de réponses spontanées. Les participants dans l'appareil d'IRMf devaient dire combien de mots identiques étaient présentés à l'écran (ex : si l'écran affiche *bird, bird, bird, bird*, le participant doit répondre 4). Les mots présentés à l'écran pouvaient être soit des noms d'animaux ou des chiffres (un, un, un, un). Dans ce dernier cas, les sujets devaient inhiber la réponse spontanée qui est de lire le chiffre plutôt que d'indiquer le nombre de mots. Dans cette dernière condition qui demandait de l'inhibition, le cortex cingulaire antérieur et le cortex préfrontal dorsolatéral des sujets étaient entre autres plus activés.

La tâche de « go/no-go », qui requiert elle aussi de l'inhibition, a également été testée à l'intérieur d'un scan (Menon, Adleman, White, Glover, & Reiss, 2001). Durant cette tâche, les participants doivent appuyer sur un bouton chaque fois qu'ils voient une lettre apparaître à l'écran (condition *go*), sauf si c'est la lettre X qui s'affiche (condition *no-go*). Menon et ses collègues s'aperçoivent que le cortex cingulaire antérieur, le cortex préfrontal dorsolatéral et le cortex préfrontal ventrolatéral font partie des régions significativement plus activées dans la condition *no-go* par rapport à la condition *go*.

Plus récemment, Houdé et ses collègues (2001), en utilisant la tomographie par émission de positrons (TEP), ont comparé les activations cérébrales de 2 groupes d'étudiants masculins (19-26 ans) capables ou non de surmonter leurs intuitions erronées dans une tâche de raisonnement déductif. Leurs résultats montrent que, chez les sujets qui arrivent à surmonter ces interférences, le cortex préfrontal ventromédial et le cortex cingulaire sont notamment plus activés.

En somme, il apparaît clairement que l'activation du cortex préfrontal (incluant le cortex cingulaire antérieur, le cortex préfrontal ventrolatéral et le cortex dorsolatéral) se retrouve dans de nombreuses études où les participants doivent surmonter des réponses intuitives. En

effet, outre les recherches mentionnées ci-dessus, plusieurs autres sont venues confirmer que les interférences intuitives sont liées à l'activation de mécanismes d'inhibition. Or, même si elles nous renseignent sur le lien entre inhibition et interférences, les études présentées ne laissent pas nécessairement entendre que ces deux concepts pourraient avoir un rôle à jouer dans les processus d'apprentissage ou de changement conceptuel. Or, plusieurs chercheurs (Dempster & Brainerd, 1995; Dempster & Corkill, 1999; Moutier, Angeard, & Houde, 2002) suggèrent que les erreurs de raisonnement des élèves seraient davantage liées à leur difficulté de résister aux interférences intuitives qu'à l'échec d'un processus complexe de raisonnement. En ce sens, il devient intéressant de se pencher sur les rares recherches qui ont analysé la capacité des élèves à surmonter des interférences intuitives en contexte scolaire.

2.4.3 Surmonter les interférences intuitives lors de tâches scolaires

Comme il a été permis de le constater à la section 2.3, les études en neurodidactique des sciences suggèrent que les mécanismes d'inhibition ont un rôle important à jouer dans le changement conceptuel. Or, la section précédente de ce cadre théorique vient appuyer l'idée que la capacité des élèves à surmonter leurs conceptions spontanées erronées serait liée à leur faculté d'inhibition, non seulement en sciences, mais lors de tâches de raisonnement variées. Par conséquent, il semble plausible que les mécanismes cérébraux liés au changement conceptuel aient une certaine parenté avec ceux liés à l'apprentissage d'autres concepts. Ainsi, même si elles ne traitent pas explicitement de changement conceptuel, il est tout de même intéressant de se pencher sur les résultats de recherches portant sur les biais de raisonnement lors de tâches scolaires. En effet, les deux études en mathématiques qui seront présentées ci-dessous pourraient avoir des implications pour l'étude du changement conceptuel.

D'abord, l'étude de Babai et ses collègues (2006; 2010) en mathématiques tentait de déterminer quelles sont les régions cérébrales activées lorsque les élèves ont recours aux règles intuitives en mathématiques. Pour ce faire, quatorze participants (âge moyen : 27,3 ans) ont eu à répondre à une tâche sur les concepts d'aire et de périmètre dans un appareil d'IRMf. Au cours de cette tâche, les participants devaient comparer les périmètres de deux

figures et déterminer si le périmètre de la deuxième était plus petit, égal ou plus grand que celui de la première (voir Figure 5 et Figure 4).

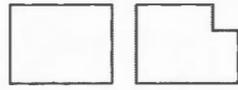


Figure 5 : Stimuli avec interférence intuitive

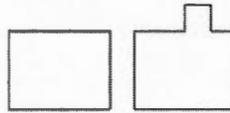


Figure 4 : Stimuli sans interférence intuitive

Certains des stimuli présentés répondaient à la règle intuitive (« plus l'aire est grande, plus le périmètre le sera »), alors que d'autres non, constituant ainsi des interférences intuitives. Stavy et Babai ont comparé l'activité cérébrale des sujets lorsqu'ils s'appuyaient sur leurs règles intuitives pour répondre (réponses correctes dans les stimuli sans interférences et réponses incorrectes dans les stimuli avec interférences) et lorsqu'ils surmontaient leurs réponses intuitives (réponses correctes dans les stimuli avec interférences). Leurs résultats indiquent que les zones cérébrales activées lorsque les élèves doivent surmonter une interférence intuitive sont différentes de celles activées lorsque leurs réponses vont de pair avec leur intuition. Dans ce dernier cas, les régions pariétales, connues pour contribuer au traitement perceptif et spatial des objets, s'activent. Lorsque les élèves doivent surmonter des interférences intuitives, ce sont plutôt les régions bilatérales du cortex préfrontal qui s'activent, des régions qui sont impliquées dans des fonctions exécutives telles l'inhibition. Stavy et Babai suggèrent que l'activation du cortex préfrontal, dans leur étude, est due à l'inhibition des réponses intuitives : « *we would suggest that, in our task, the orbital frontal cortex's function is to inhibit the automatic unavoidable processing of the interfering feature area in the parietal lobes* » (Ruth Stavy, Goel, et al., 2006, p. 387).

Ils ne sont d'ailleurs pas les premiers à suggérer que l'activation de ces régions pourrait être liée au fait de surmonter des règles intuitives :

« the ventrolateral PFC is consistently involved in representing sets of conditional rules, suggesting that it plays a fundamental role in rule representation, whereas fMRI data suggest that the dorsolateral PFC may be especially important for overcoming interference from previously learned rules. »
(Bunge & Zelazo, 2006, p. 120)

Le rôle de l'inhibition dans la capacité de surmonter des interférences en mathématiques a aussi été mesuré dans l'étude de Houdé et ses collègues (Houdé, et al., 2011). Durant cette tâche, soixante élèves de 5 à 10 ans placés dans un appareil d'imagerie cérébrale devaient répondre à une tâche de conservation du nombre piagétienne. Au cours de cette tâche mathématique, l'élève est face à deux rangées de jetons en nombre égal mais de longueur différente (étant donné l'écartement entre les jetons). Alors que les jeunes enfants considèrent « qu'il y a plus de jetons là où c'est plus long », ils seront capables, à partir de 6-7 ans, d'estimer qu'il y en a le même nombre dans les deux rangées. Pour arriver à surmonter cette erreur d'intuition perceptive (plus la rangée de jetons est longue, plus le nombre est élevé), l'enfant doit arriver à inhiber la stratégie « longueur égale nombre ». Les résultats de cette étude démontrent que les changements cognitifs permettant aux enfants d'accéder à la conservation du nombre sont liés à la contribution des réseaux neuronaux du cortex pariétal et du cortex préfrontal : « *success in Piaget's conservation-of-number task requires a more important involvement of parietal regions, conjointly activated with the prefrontal lobe* » (Houdé, et al., 2011, p. 12).

Selon les deux études décrites ici, il semble qu'un meilleur raisonnement face à des tâches logico-mathématiques implique les régions cérébrales préfrontales, liées à l'inhibition. Cela suggère que pour mieux réussir ces tâches mathématiques, le cerveau de l'enfant doit développer cette capacité d'inhibition cognitive. Dans cette perspective, il devient nécessaire de comprendre comment cette capacité d'inhibition se développe à travers l'âge pour mieux permettre aux individus de corriger leurs biais de raisonnement.

2.4.2 Développement de l'inhibition

Au sein de la population, il semble que ce soient les jeunes enfants qui, de loin, sont les plus sensibles aux interférences. En effet, dès les années 60, il a été démontré que ceux-ci performaient mal à de nombreux tests psychologiques impliquant l'inhibition, notamment le test de Stroop décrit plus haut. Par exemple, Rand, Wapner et McFarland (1963) ont analysé la performance d'élèves âgés de 6 à 18 ans à ce test et ont trouvé que les erreurs d'intrusion, par exemple lire le nom de la couleur plutôt que de nommer la couleur de l'encre, étaient

celles qui diminuaient le plus avec l'âge. Les jeunes enfants sont également moins performants à la tâche de « Stop signal paradigm », qui implique aussi d'inhiber une réponse motrice (Schachar & Logan, 1990).

De leur côté, Chelune et Baer (1986) ont soumis 105 élèves de la première à la sixième année au test WCST décrit dans la section 2.4.1. Leurs résultats démontrent que les élèves plus âgés ont moins tendance à faire des erreurs de persévérance (*perseverative errors*) que les plus jeunes. Également, l'augmentation de leur performance est plus rapide entre 6 et 7 ans, alors que d'autres accroissements moindres se produisent entre 8 et 10 ans. Enfin, la performance des élèves âgés de 10 ans est similaire à celle d'adultes, même si les erreurs de persévérance ne diminuent pas à un niveau adulte avant 12 ans.

Plus récemment, l'équipe de Kwon et Lawson (2000a; 2000b) a démontré que la capacité d'inhibition, mesurée par des tests neuropsychologiques, était la fonction exécutive montrant le plus de liens avec la capacité de (a) raisonner scientifiquement et de (b) performer à des tâches sur le raisonnement proportionnel. Selon ces chercheurs, la capacité de raisonnement scientifique augmenterait légèrement entre 13 et 14 ans, puis de façon encore plus prononcée entre 14 et 16 ans. Ils attribuent ces résultats à la maturation des lobes préfrontaux (notamment responsables du contrôle inhibiteur au cours de l'adolescence).

« In short, maturation of the prefrontal lobes during early adolescence appears to be linked to students' abilities to inhibit task-irrelevant information and mentally represent task-relevant information, which along with both physical and social experience influences scientific reasoning ability and students' ability to reject intuitively derived scientific misconceptions and accept scientific but counterintuitive theoretical conceptions. » (Kwon & Lawson, 2000, p. 56)

Les quatre exemples présentés plus haut illustrent bien que les jeunes enfants et adolescents ont de la difficulté à inhiber. Au sein du champ développemental en psychologie, il est d'ailleurs relativement bien établi que cette capacité d'inhibition augmente de l'enfance à la période adulte (Bedard, et al., 2002; Christ, White, Mandernach, & Keys, 2001), et est accompagnée d'un accroissement de la performance aux tâches qui impliquent de surmonter des interférences.

Récemment, des études en imagerie cérébrale sont venues suggérer que ces différences de performances cognitives coïncideraient avec la maturation des mécanismes cérébraux responsables de l'inhibition :

« The development of the prefrontal cortex is thought to play an important role in the maturation of higher cognitive abilities. Mature cognition is characterized by the ability to filter and suppress irrelevant information and actions (sensorimotor processes), in favor of relevant ones (i.e. cognitive control). A child's capacity to filter information and suppress inappropriate actions in favor of appropriate ones continues to develop across the first two decades of life, with susceptibility to interference from competing sources lessening with maturity. Many paradigms used to study cognitive development require cognitive control such as the Stroop and Go/No-go tasks. Collectively, imaging studies using these tasks as probes show that children recruit distinct but often more prefrontal regions, both ventral and dorsal, when performing these tasks than do adults. » (Casey, Tottenham, Liston, & Durston, 2005, p. 106)

Cette activation accrue du cortex préfrontal chez les enfants lors de l'inhibition de réponses intuitives seraient probablement dues, selon Tamm et al. (2002), au recrutement inefficace des régions cérébrales liées aux fonctions exécutives. D'après eux, les jeunes sujets utilisent des stratégies moins efficaces qui requièrent des régions diffuses du cortex préfrontal, alors que les sujets plus âgés démontrent une activation plus focalisée de régions spécifiquement liées à l'inhibition.

Il semble donc que la maturation du cortex préfrontal joue un rôle important dans le développement des comportements qui nécessitent un contrôle inhibiteur (pour un tour de la question, voir van den Wildenberg & Crone, 2005). De plus, *« improvements in rule use during middle childhood and adolescence are likely related to maturation of the lateral PFC »* (Bunge & Zelazo, 2006, p. 120). Or, le cortex préfrontal est la dernière région cérébrale à se développer, n'atteignant la pleine maturité qu'à l'adolescence (Gogtay et al., 2004; Sowell et al., 2004). Ainsi, les changements significatifs que subit le cortex préfrontal au cours de la puberté pourraient être responsables du développement de la capacité à inhiber. Il convient ici de mentionner que l'âge des apprenants n'est vraisemblablement pas le seul responsable du développement de ces régions cérébrales, et donc de l'inhibition; cette maturation cérébrale peut en effet être due à d'autres facteurs (ex.: qualité de la formation scolaire, richesse des expériences vécues, etc.). En somme, la spécialisation croissante des

régions du cortex préfrontal, qui jouent un rôle spécifique dans l'inhibition, serait liée à de meilleures performances lors de tâches impliquant des interférences intuitives.

2.5 L'immédiateté : caractéristique des réponses intuitives

Comme il a été permis de constater plus haut, les élèves semblent s'appuyer, en sciences comme dans d'autres disciplines, à outrance sur leurs règles intuitives, ce qui semble avoir un impact considérable sur leurs performances. Or, une des caractéristiques principales des réponses intuitives est leur immédiateté : « belief-based "heuristic" processes are rapid, associative, and implicit » (Stupple & Ball, 2008). Ainsi, les élèves qui arrivent à donner des réponses correctes lorsqu'ils ont à surmonter leurs conceptions intuitives prendraient, en comparaison, plus de temps pour le faire.

La mesure du temps de réaction, fort répandue en psychologie, a permis de confirmer empiriquement cette différence à de nombreuses occasions. Elle consiste en la mesure de l'intervalle de temps entre la présentation d'un stimulus (visuel, auditif...) et l'exécution d'une réponse (généralement, appuyer sur un bouton). Cette valeur donne une indication de l'ampleur du traitement neuronal qui se produit entre le stimulus et la réponse.

Le temps de réaction des sujets lorsqu'ils parviennent à surmonter des interférences intuitives a notamment été mesuré dans le cadre d'études développementales. Notamment, Williams et ses collègues (Williams, Ponesse, Schachar, Logan, & Tannock, 1999) ont demandé à 275 sujets de 6 à 81 ans, dont 120 enfants, de répondre à une tâche de type « go/no-go » décrite précédemment. Ils ont trouvé que, dans les deux conditions (go et no-go), l'immédiateté des réponses correctes augmentait durant l'enfance, indiquant une exécution plus rapide (et donc une inhibition plus efficace de la réponse intuitive). En moyenne, les enfants plus âgés (9-12 ans) étaient significativement plus rapides de 50 ms que les plus jeunes (6-8 ans) lorsqu'ils devaient inhiber leur réponse spontanée, alors qu'ils répondaient 170 ms plus vite dans la condition *go*.

L'immédiateté des réponses des individus lorsqu'ils sont face à des interférences intuitives a été étudiée dans de nombreuses recherches en psychologie, mais commence tout juste à être explorée en éducation. Parmi les rares études qui en tiennent compte, il y a celles de Babai et ses collègues (Babai & Amsterdamer, 2008; Babai, Levyadun, et al., 2006; Babai, Zilber, Stavy, & Tirosh, 2010). Dans la première, le temps de réaction a été mesuré lors d'une tâche en sciences autour des concepts de solide et de liquide. Au cours de cette tâche, quarante et un élèves de 9^e année devaient classer correctement différents solides (rigides/non-rigides/poudres) et liquides (denses/fluides). Étant donné que beaucoup d'élèves entretiennent des conceptions erronées autour de cette notion, leurs résultats indiquent un plus haut taux de succès lorsque les élèves sont devant des stimuli intuitifs (solides rigides et liquides fluides). De plus, le temps de réaction lorsque les élèves étaient devant des stimuli contre-intuitifs (solides non-rigides et poudres, liquides denses) était significativement plus long que lorsqu'ils étaient face aux stimuli intuitifs. Ces résultats suggèrent selon eux que « *reasoning processes associated with correct classification of objects that are not consistent with the naive conceptions are more demanding* » (Babai & Amsterdamer, 2008, p. 557).

Babai et ses collègues (2006) ont aussi effectué une étude du même genre en mathématiques, en utilisant la tâche de comparaison de périmètre décrite à la section 2.4.3 de ce cadre théorique. Ils arrivent encore au même résultat : les réponses intuitives des élèves (qui répondent à la règle intuitive « plus l'aire est grande, plus le périmètre le sera ») demandent généralement un moins long délai de réaction que celles qui sont contre-intuitives. Enfin, dans une troisième étude (Babai, et al., 2010), cette équipe de recherche a voulu savoir si une intervention pouvait influencer la performance et le temps de réaction des élèves à une version dérivée de la tâche de comparaison de périmètres/aires. Ils suggèrent qu'après un enseignement, la hausse du temps de réaction des élèves devant des stimuli contre-intuitifs indique que l'intervention a permis d'attirer leur attention sur les variables pertinentes.

À notre connaissance, cette équipe de chercheur est la seule à avoir utilisé le temps de réaction pour tenter de comprendre le rôle des règles intuitives dans l'apprentissage, une stratégie qui génère déjà des résultats prometteurs. Or, bien que fort pertinentes, aucune de

ces études ne nous renseignent sur l'évolution de la capacité à surmonter des interférences en sciences avec l'âge.

2.6 Hypothèses de recherche

Comme il a été permis de le constater dans ce chapitre, l'inhibition des interférences intuitives semble jouer un rôle important dans le processus de changement conceptuel. En effet, pour parvenir à un raisonnement correct, en sciences comme dans d'autres domaines, il apparaît nécessaire d'inhiber les stratégies spontanées qui mènent souvent à des réponses erronées.

S'inscrivant dans la continuité des recherches détaillées dans ce cadre théorique, la présente recherche tente de confirmer le rôle de l'inhibition dans la capacité des élèves à surmonter les interférences intuitives en sciences. Pour ce faire, nous proposons de concevoir une tâche permettant de répondre à la question centrale de cette étude : *le temps de réaction des élèves de 8 à 14 ans devant des interférences intuitives en sciences est-il lié à leur capacité à surmonter celles-ci ?* Plus spécifiquement, les objectifs secondaires de ce projet consisteront à déterminer, lors d'une tâche en sciences impliquant des interférences intuitives :

- 1) S'il existe bel et bien une relation entre le temps de réaction des élèves et leur capacité à surmonter ces interférences (vérifier ainsi les données obtenues par les chercheurs de l'équipe de Babai) ;
- 2) Si la relation entre la capacité des élèves à surmonter des interférences et leur âge concorde avec le développement déjà connu de leurs mécanismes d'inhibition.

En se basant sur les considérations théoriques détaillées dans ce chapitre, notamment les études qui suggèrent que le temps de réaction est un bon indicateur de l'utilisation de règles intuitives, et celles qui révèlent que l'âge des élèves est indissociable du développement de leurs mécanismes d'inhibition, les hypothèses suivantes ont été formulées :

Devant une tâche en science faisant appel aux règles intuitives :

1. Le temps de réaction moyen sera plus élevé lorsque les élèves doivent surmonter des interférences intuitives que lorsqu'ils répondent en lien avec leur intuition.
2. Les stimuli contre-intuitifs seront davantage réussis chez les élèves plus âgés.
3. Le temps de réaction moyen aux stimuli contre-intuitifs réussis diminuera avec l'âge.

Si ces hypothèses sont vérifiées, il sera possible de fournir des données permettant d'offrir une perspective théorique nouvelle de la construction de connaissances scientifiques qui impliquerait la nécessité de développer la capacité à résister ou à supprimer les interférences des conceptions spontanées.

2.7 Choix d'étudier les interférences intuitives autour du concept de masse volumique

Afin d'opérationnaliser les hypothèses de recherche décrites ci-dessus, une dernière étape est nécessaire : le choix d'un concept scientifique dont l'acquisition nécessite un changement conceptuel, ainsi que l'âge des sujets chez qui il sera étudié. En parcourant la littérature, l'étude de la maîtrise du concept de la masse volumique chez les élèves de 8 à 14 ans s'est imposée. Cette décision sera justifiée dans la présente section.

D'abord, parmi les concepts scientifiques réputés comme étant difficiles à acquérir par les élèves, la masse volumique figure parmi les plus ardues (Smith, Maclin, Grosslight & Davis, 1997). Déjà, il y a plus de trente ans, Piaget et Inhelder (1974) en avaient fait le constat. Pourtant, ce concept est souvent exploré dès la petite enfance : avec des expériences de type « flotte/coule », les jeunes enfants seraient déjà en mesure de développer une compréhension intuitive de propriétés comme la masse, le volume et la masse volumique (Klopper, Champagne, & Chaiklin, 1992). Cependant, ces intuitions évoluent rarement en conceptions scientifiques sophistiquées au cours de leur cheminement scolaire (Roach, 2001). En effet, de nombreuses études ont démontré que même après avoir abordé cette notion à plusieurs reprises au cours de leur scolarité, les élèves éprouvent toujours de la difficulté à comprendre le concept de masse volumique et de le relier aux relations mathématiques impliquées (Dawkins, Dickerson, McKinney, & Butler, 2008). Pourtant, la maîtrise de ce concept est essentielle pour que les élèves puissent développer la compréhension d'autres notions, telles que la conservation de la matière, les mouvements et les forces (Balfé, 2005). Dans ces

circonstances, il est nécessaire, comme le dit Klinger (2006), que de futures recherches se penchent sur les difficultés des élèves en lien avec ce concept.

2.7.1 L'origine des difficultés des élèves

Afin de mieux comprendre les difficultés des élèves avec le concept de masse volumique, il apparaît essentiel de d'abord définir cette propriété fondamentale de la matière. La masse volumique est une grandeur physique qui représente la masse (m) d'un corps homogène occupant un volume (V). Ce rapport est généralement noté par la lettre grecque ρ (*rhô*), de telle sorte que $\rho = \frac{m}{V}$. La masse volumique s'exprime le plus souvent en kilogrammes par mètre cube (kg/m^3) ou en grammes par centimètre cube (g/cm^3).

De nombreux chercheurs soutiennent que la définition même de la masse volumique, telle que formulée plus haut, serait à l'origine des difficultés des élèves avec ce concept. En effet, la masse volumique n'étant pas une mesure directe, mais plutôt l'expression d'une relation ou d'un ratio entre deux mesures (la masse et le volume), sa compréhension exigerait donc la maîtrise de ratio et de proportions en mathématiques (Rowell & Dawson, 1977). Or, il semble que la compréhension du raisonnement proportionnel pose problème aux élèves; cela se reflèterait notamment par les difficultés récurrentes qu'ils ont avec les concepts scientifiques impliquant des quantités intensives (Howe, Nunes, Bryant, Bell, & Desli, 2010). Le fait que la masse volumique ne soit qu'indirectement perceptible au travers de calculs, aurait donc un rôle à jouer dans l'origine des difficultés des élèves en lien avec ce concept (Kang, Scharmann, & Noh, 2004).

Une autre des raisons les plus fréquemment évoquées comme étant à l'origine des difficultés des élèves avec le concept de masse volumique est la maîtrise des notions sous-jacentes à celle-ci, que sont la masse et le volume. En effet, il apparaît que les difficultés des élèves en lien avec la masse volumique soient dues à :

- *des conceptions initiales erronées en lien avec le volume et la masse ;*
- Déjà, il y a quelques décennies, Piaget avait relevé que beaucoup percevaient comme équivalents le volume, la masse, la masse volumique, le poids, la quantité de matière et la grosseur (Piaget & Inhelder, 1974).

- *de la confusion entre la masse et le poids;*

Plusieurs études (exemples: Hewson, 1986; Margolis & Laurence, 1999; Smith et al., 1997) ont montré que la plus grande difficulté des élèves autour du concept de masse volumique est l'incapacité de distinguer masse et poids : « *for most pupils, density represents a relation between weight and volume and not between mass and volume* » (Fassoulopoulos, Kariotoglou, & Koumaras, 2003). De nombreux élèves croient en effet que la masse d'un objet peut varier, alors que c'est plutôt son poids qui change selon l'environnement (chaleur, pression, etc.). Cette erreur peut être attribuée au fait que, sous des conditions gravitationnelles normales, la masse et le poids sont directement proportionnels (Wilkening & Cacchione, 2010). Aussi, le poids d'un objet, contrairement à sa masse, peut être perçu en le soulevant (Driver et al., 1994). Bref, il semble que la distinction entre masse et poids est rarement acquise avant l'âge de 14-15 ans (Rowell & Dawson, 1977).

- *de la confusion entre la masse volumique et le poids;*

Dans le même ordre d'idée, Smith et ses collègues (1985; 1992) ont démontré qu'il est difficile pour les enfants de reconnaître la masse volumique et le poids comme deux différents concepts (1985, 1992).

Enfin, une hypothèse récente qui tente d'expliquer les difficultés des élèves en lien avec la masse volumique suggère que les élèves n'auraient pas des difficultés spécifiques avec ce concept particulièrement, mais un problème plus général avec l'utilisation de règles intuitives avec les quantités intensives. En effet, selon les chercheurs Libarkin, Crockett et Sadler (2003), les fausses idées des élèves à propos de la masse volumique seraient, la plupart du temps, issues d'inférences intuitives (*overgeneralisations*) nées de leurs observations ou de leurs expériences directes. Sans en faire l'objet d'une étude, Stavy et Tirosh (2000) laissent aussi entendre que la règle « *More A-More B* ». affecterait le raisonnement des élèves lors de tâches impliquant des quantités intensives, comme la masse volumique. Par exemple, les élèves pourraient croire que plus un objet est volumineux, plus il coulera dans l'eau.

En se basant sur les travaux de Stavy et Tirosh, des chercheurs californiens (Yeend, Loverude, & Gonzalez, 2001) tentent d'ailleurs d'interpréter les résultats de leur étude, qui portait sur les conceptions des élèves relativement à la masse volumique :

« Many student responses show a consistent pattern of associating each of the quantities mass, volume, and density with size. These responses can be interpreted as illustrating an inability to distinguish between these related concepts. An alternative interpretation is based on the work of Stavy and Tirosh, who assert that many students answer questions in mathematics by appealing to intuitive rules: the rule 'More A - More B' is the common core to many reported apparent misconceptions. » (Yeend, et al., 2001, p. 4)

Selon Yeend et ses collègues, les réponses les plus communes des élèves aux questions qualitatives de leur questionnaire auraient pu être formulées en appliquant la règle « More of A – More of B ». Dans les cas où l'application de cette règle intuitive menait à une réponse incorrecte, l'utilisation de celle-ci expliquerait, selon les auteurs, le bas taux de succès à ces questions. Bref, cette recherche vient appuyer l'idée que les difficultés des élèves autour du concept de masse volumique pourraient être dues à l'application d'une règle intuitive.

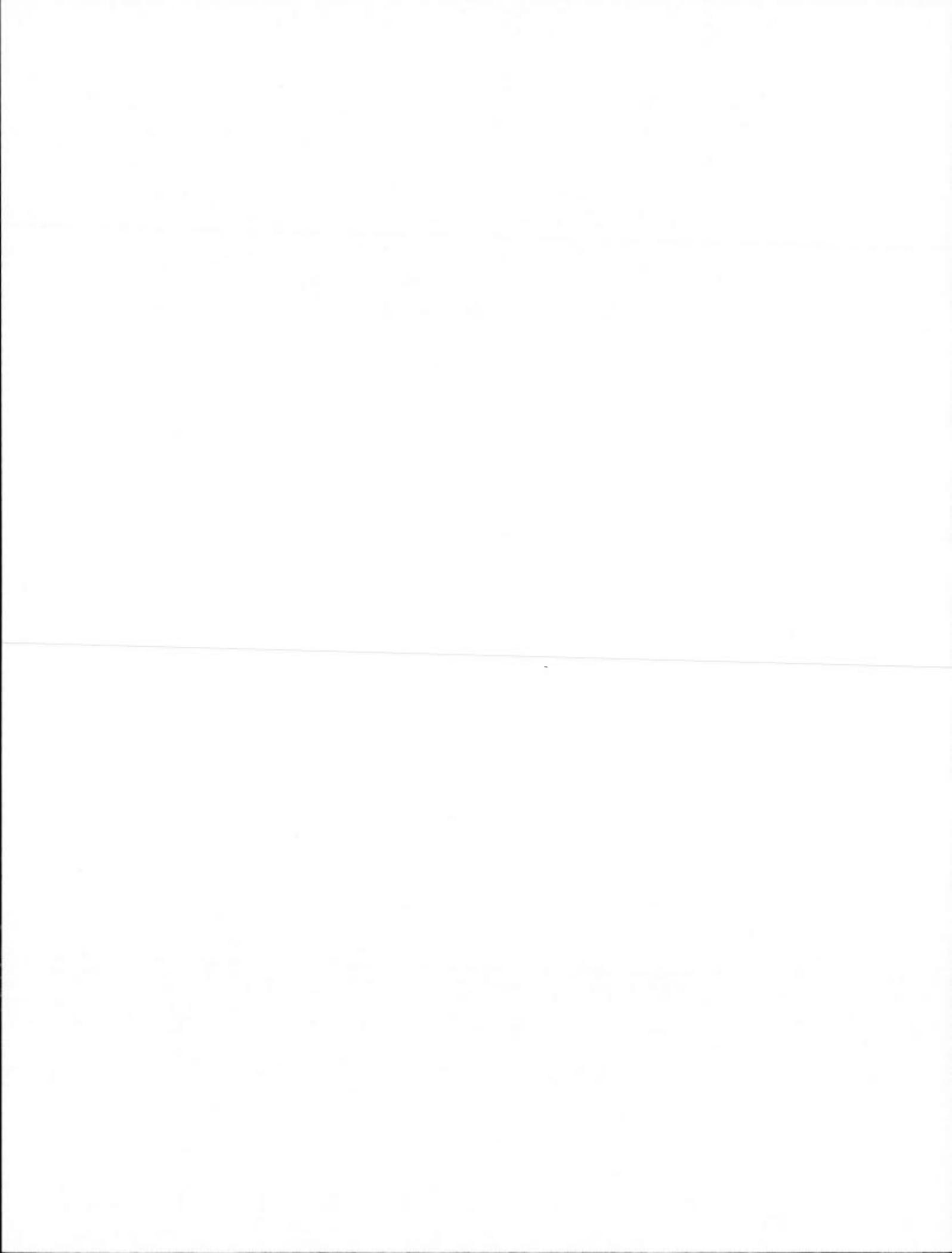
2.8 Choix de l'approche transversale

Étant donné que les difficultés des élèves avec le concept de masse volumique semble liées à l'utilisation de règles intuitives, et que la capacité de surmonter celles-ci est associée au développement des mécanismes d'inhibition (voir section 2.4), il devient intéressant de se pencher sur le développement de la maîtrise de ce concept avec l'âge afin de déterminer s'il serait lié au développement des mécanismes d'inhibition vu plus haut. Ainsi, une dernière étape est nécessaire afin d'opérationnaliser les hypothèses décrites précédemment : il faut déterminer de quelle façon sera étudié le développement de la capacité de surmonter des interférences intuitives liées à la masse volumique.

À la section 2.4, il a été possible de constater que la maturation des mécanismes cérébraux liés à l'inhibition, et donc le développement de la capacité de surmonter des interférences, s'échelonnaient sur de longues périodes (6 à 20 ans). Par conséquent, un devis de recherche longitudinal qui comparerait un même sujet et mesurerait les changements liés à l'âge est

difficilement réalisable à l'intérieur d'un intervalle de temps raisonnable. C'est pourquoi l'approche transversale, qui évalue les différences entre les comportements au cours d'une période définie chez des groupes d'âges différents, s'avère être un choix beaucoup plus réaliste et sera privilégiée pour ce projet de recherche. Or, cette approche transversale a des limites dont il faudra tenir compte dans l'analyse des résultats.

Avec ce dernier choix conceptuel, l'objectif de la présente recherche se concrétise. Il consiste ainsi à répondre à la question suivante : les élèves plus âgés arrivent-ils plus rapidement que les jeunes élèves à surmonter des interférences intuitives liées à la masse volumique? La réponse à cette question pourrait avoir des répercussions sur la façon de concevoir l'apprentissage des sciences. En effet, si cette hypothèse se confirme et que les élèves plus âgés répondent plus rapidement et mieux (taux de réussite supérieur) que les élèves plus jeunes, cela pourrait être attribué au développement de leurs mécanismes d'inhibition: ils arriveraient davantage à inhiber leurs réseaux de neurones associés à des réponses spontanées (ou règles intuitives) en lien avec la masse volumique. Le prochain chapitre explicitera la démarche méthodologique qui permettra d'opérationnaliser ces objectifs de recherche.



CHAPITRE III

MÉTHODOLOGIE

De nature empirique et quantitative, cette recherche a pour objectif de vérifier si la capacité des élèves de surmonter des interférences intuitives liées au concept de la masse volumique peut être liée au développement de l'inhibition chez ceux-ci. Afin de répondre à cette question de recherche, le devis méthodologique sera présenté et justifié dans ce chapitre, en prenant appui sur le cadre théorique exposé dans le chapitre précédent. D'abord, la tâche présentée et l'instrument de collecte de données seront décrits. Ensuite, les caractéristiques des sujets, ainsi que les méthodes d'échantillonnage choisies seront précisées. Puis, le déroulement de la tâche du point de vue des sujets sera détaillé. Pour chacun des éléments énumérés ci-dessus, les justifications et les limites des choix méthodologiques seront explicitées. Enfin, les considérations éthiques d'usage concluront cette section.

3.1 L'instrument de collecte de données

3.1.1 Description de l'instrument

Afin de vérifier les hypothèses décrites dans le précédent chapitre, une tâche informatisée permettant d'évaluer la capacité des élèves à surmonter des interférences intuitives liées à la masse volumique a dû être construite. Bien qu'il existe de nombreuses tâches qui permettent d'évaluer l'exactitude des réponses des élèves devant des interférences intuitives en sciences ou en mathématique, rares sont celles qui mesurent avec précision le temps de réaction. De plus, aucune de ces tâches n'a, à ce jour, porté sur les interférences intuitives liées au concept de masse volumique, d'où la nécessité d'en construire une.

Le logiciel E-prime® (Psychology Software Tools, inc.), qui permet de présenter des stimuli sur un écran et de mesurer avec précision les données comportementales (temps de réaction, exactitude des réponses) obtenues avec un clavier, semblait tout désigné pour produire et exécuter une telle tâche. D'autres chercheurs en didactique des sciences souhaitant présenter

des stimuli intuitifs et contre-intuitifs (exemple : Masson, 2012) l'ont d'ailleurs choisi auparavant.

Ainsi, la tâche conçue dans le cadre de la présente recherche présentait plusieurs stimuli aux élèves sur des écrans d'ordinateurs portables Intel® Core™2 Duo Processor T7700 (Taille : 15.4"; Résolution : 1280 x 1024 pixels) fonctionnant sous Windows XP. La présentation des stimuli et l'enregistrement des données comportementales des sujets (temps de réaction et exactitude des réponses) ont entièrement été contrôlés par le logiciel E-Prime.

3.1.2 Description de la tâche

La tâche proposée avait pour objectif d'évaluer la capacité des élèves à surmonter des interférences intuitives liées au concept de la masse volumique. Pour ce faire, elle devait permettre de comparer le temps de réaction de ces derniers lorsqu'ils sont devant des stimuli conformes à leurs règles intuitives et lorsqu'ils sont devant des stimuli contre-intuitifs (interférences intuitives). Ainsi, deux mesures comportementales ont été enregistrées par E-prime pendant que les élèves répondront aux différentes parties de la tâche informatisée : l'exactitude des réponses des élèves et leur temps de réponse.

Exactitude des réponses :

Pour chacun des stimuli présentés, la réponse scientifiquement correcte qui lui est associée sera entrée dans un tableau à l'aide du logiciel E-Prime. À l'aide de cette information, E-Prime détermine automatiquement si la réponse donnée par l'élève est correcte (1) ou non (0).

Temps de réponse :

Le temps de réponse des élèves sera également enregistré pour chacun des stimuli présentés. Afin que ce temps de réaction soit uniquement représentatif du raisonnement des élèves, et non pas attribuable à d'autres éléments, il faudra contrôler toutes les variables qui peuvent influencer la vitesse de touche des élèves, ce qui sera discuté dans la section 1.2.2

Considérant que la présente recherche s'intéresse aux conceptions erronées des jeunes élèves en lien avec la masse volumique, et que peu d'entre eux maîtrisent le sens de l'expression *masse volumique* avant qu'il ne soit abordé en troisième secondaire (15 ans), les items présentés aux élèves ne pouvaient pas impliquer cette connaissance préalable chez eux. Par

exemple, une question comme « Lequel de ces objets a la plus grande (ou plus petite) masse volumique? » ne pouvait donc être envisagée. De plus, une pré-expérimentation auprès d'élèves de 8 ans nous a permis de constater qu'il est difficile pour les élèves de cet âge de comprendre le sens du mot « dense ». Ainsi, une question comme « Lequel ces objets est le plus dense? » ne pouvait pas non plus être posée. Bref, les termes choisis ne pouvaient que sous-entendre des notions liées à une maîtrise conceptuelle de la masse volumique, par exemple impliquant la flottabilité (flotte/coule) des objets, que les élèves de bas âge ont tous déjà expérimenté.

Conséquemment, des stimuli impliquant la présence d'eau et les conceptions liées à la flottabilité ont d'abord été conçus. Les élèves devaient indiquer si ces stimuli étaient réalistes (possibles) ou non. Toutefois, il apparut rapidement que la position des objets qui flottent par rapport à la surface de l'eau (plus ou moins submergés) était très suggestive et pouvait induire les élèves en erreur sur l'exactitude scientifique du stimulus, ou les amener à modifier leur façon de répondre au cours de la tâche. La solution qui a été envisagée est de ne pas présenter les objets dans l'eau, mais de plutôt laisser aux élèves le soin de s'imaginer leurs positions dans ce liquide. Ainsi, la tâche retenue en est une de comparaison entre la masse volumique des objets présentés.

3.1.2.1 Stimuli présentés

Chaque stimulus présentait simultanément trois balles que les élèves devaient observer et comparer. Les élèves devaient ensuite répondre à la question suivante : « Si on les met dans l'eau, laquelle de ces boules coulera davantage? ». Une partie des stimuli proposés étaient conformes avec la règle intuitive des élèves (« plus un objet est volumineux, plus il coulera »), alors que les autres étaient contre-intuitifs (voir Tableau 4). Les stimuli étaient montrés à l'écran jusqu'à ce qu'une réponse du clavier soit détectée. Après la réponse, le stimulus était remplacé par un écran gris (Figure 6) servant de pause pendant 2500 ms, qui était suivi du prochain stimulus.



Figure 6 : Écran gris servant de pause

Un total de 80 stimuli ont été conçus, dont 36 sont contre-intuitifs, 36 intuitifs et 8 contrôles. Chaque stimulus affichait trois boules, de tailles égales ou différentes (3 tailles possibles). Ces boules étaient composées de l'un de ces trois matériaux : plomb, bois ou mousse de polystyrène (Figure 7). Malgré le souci de représenter les textures et la rondeur des boules de façon réaliste, il peut s'avérer difficile de symboliser des boules tridimensionnelles sur un écran ne possédant que deux dimensions. Par conséquent, il était précisé à l'oral aux élèves que les boules étaient pleines à l'intérieur et composées des matériaux énumérés ci-dessus.

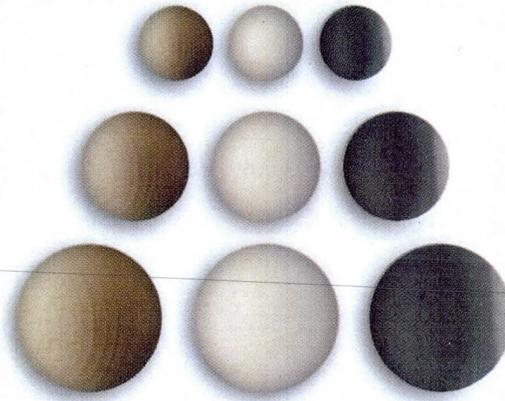
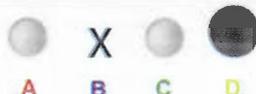
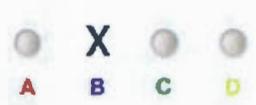
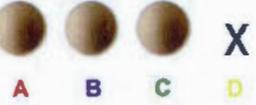


Figure 7 : Éventail de toutes les boules présentées

Les colonnes représentent les 3 matériaux possibles (bois, mousse de polystyrène et plomb), tandis que les lignes correspondent aux trois différentes tailles de balles.

Tableau 4 : Exemples de stimuli intuitifs et contre-intuitifs

	« Si on les met dans l'eau, laquelle de ces boules coulera davantage? »	Réponses
Stimuli intuitifs	 A B C D	Réponse correcte et en lien avec la règle intuitive : D
	 A B C D	Réponse correcte et en lien avec la règle intuitive : B

Stimuli contre-intuitifs	 X ● ● ● A B C D	Réponse en lien avec la règle intuitive : B Réponse correcte : A
	 ● ● X ● A B C D	Réponse en lien avec la règle intuitive : B Réponse correcte : C
Stimuli contrôles	 ● X ● ● A B C D	Réponse correcte : B
	 ● ● ● X A B C D	Réponse correcte : D

On peut considérer que les stimuli présentés sont équivalents quant à leur difficulté. En effet, ils présentent tous le même nombre de balles (3), impliquent toujours de répondre à une même consigne (*Laquelle de ces balles coulera davantage si on les met dans l'eau?*) avec les mêmes doigts (index et majeurs) et nécessitent tous de comparer la taille et le matériel dont les balles sont faites. Par conséquent, les différences de temps de réaction aux stimuli ne pourront être attribuées à la difficulté de ceux-ci.

3.1.2.2 Variables pouvant influencer le temps de réaction

Pour répondre aux stimuli, il était demandé aux participants d'utiliser leurs index et leurs majeurs de leurs deux mains, tel qu'il est possible de le voir à la Figure 8. Sur chaque clavier, des papiers adhésifs vert, jaune, rouge et bleu étaient placés sur les touches qui correspondent aux lettres Z, X, M et N (voir Figure 9).



Figure 8 : Doigts utilisés pour répondre à la tâche.



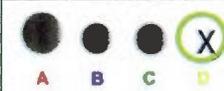
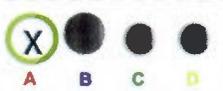
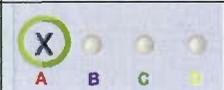
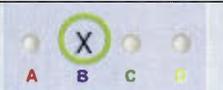
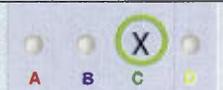
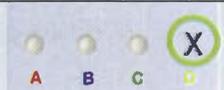
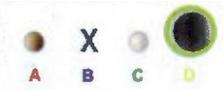
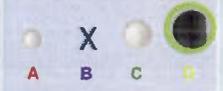
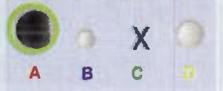
Figure 9 : Touches A, B, C et D sur le clavier

Divers facteurs peuvent influencer la vitesse de touche (« *tapping* ») du clavier : l'âge, le sexe, le clavier en soi, la main utilisée (dominante ou non), les doigts utilisés, les conditions pathologiques et l'entraînement de chacun (Aoki, Francis, & Kinoshita, 2003). Afin que le temps de réaction aux stimuli soit uniquement représentatif du raisonnement des élèves, et non pas attribuable à l'un de ces éléments, il a fallu contrôler toutes ces variables qui peuvent influencer la vitesse de touche des élèves.

Pour ce faire, il a d'abord fallu que tous les participants utilisent le même clavier, ce qui fut le cas, étant donné que les ordinateurs portables fournis aux élèves étaient tous identiques. Ensuite, afin de contrôler les différences de vitesse avec les doigts, il a fallu créer des versions équivalentes de la tâche, de manière à ce que les quatre différentes réponses possibles aient autant de chances d'être répondues par n'importe quel doigt ou main (voir Tableau 5). Les sujets étaient donc répartis en quatre groupes équivalents: un quart des élèves a répondu à la version 1 de la tâche, un quart à la version 2, etc.

Tableau 5 : Exemples de stimulus et versions de la tâche

 = réponse correcte

	Version 1	Version 2	Version 3	Version 4
Stimulus 1				
Stimulus 2				
Stimulus 3				
Stimulus 4				
...				

Une fois ces quatre groupes créés, il était plus facile de contrôler les facteurs d'âge et de sexe en y répartissant également (dans la mesure du possible) le pourcentage de filles et les garçons, ainsi que de droitiers et de gauchers. De plus, les sujets de chaque niveau scolaire ont été répartis à peu près également dans ces versions équivalentes de la tâche.

3.1.2.3 Tâche de pratique

De manière à s'assurer que le temps de réaction devant les stimuli n'est attribuable à aucune des variables mentionnées précédemment (âge, sexe, mains et doigts utilisés pour répondre, entraînement, clavier, etc.), et que les élèves comprennent la tâche et maîtrisent le clavier, une tâche de pratique leur a été proposée. Elle était méthodologiquement en tout point similaire à la tâche décrite plus haut, à l'exception que les stimuli présentaient des articles de sport (plutôt que des boules). Les élèves devaient indiquer si l'un des articles présenté était un ballon de soccer et, le cas échéant, désigner sa position (A, B, C ou D). S'il n'y avait pas de ballon de soccer à l'écran, ils devaient répondre « X ». Quatre versions équivalentes de cette tâche de pratique ont également été créées, de façon à ce que les quatre différentes réponses possibles aient autant de chances d'être répondues par n'importe quel doigt ou main. (voir Tableau 6)



Figure 10 : Exemples de stimuli de la tâche de pratique

Dans le stimulus de gauche, la bonne réponse est C Dans le stimulus de droite, la bonne réponse est D

Tableau 6 : Exemple de stimuli et versions de la tâche de pratique

	Tâche 1	Tâche 2	Tâche 3	Tâche 4
Stimulus 1	<input checked="" type="checkbox"/> A <input type="checkbox"/> B <input type="checkbox"/> C <input type="checkbox"/> D	<input type="checkbox"/> A <input type="checkbox"/> B <input type="checkbox"/> C <input checked="" type="checkbox"/> D	<input type="checkbox"/> A <input type="checkbox"/> B <input checked="" type="checkbox"/> C <input type="checkbox"/> D	<input type="checkbox"/> A <input checked="" type="checkbox"/> B <input type="checkbox"/> C <input type="checkbox"/> D
Stimulus 2	<input type="checkbox"/> A <input checked="" type="checkbox"/> B <input type="checkbox"/> C <input type="checkbox"/> D	<input checked="" type="checkbox"/> A <input type="checkbox"/> B <input type="checkbox"/> C <input type="checkbox"/> D	<input type="checkbox"/> A <input type="checkbox"/> B <input type="checkbox"/> C <input checked="" type="checkbox"/> D	<input type="checkbox"/> A <input type="checkbox"/> B <input checked="" type="checkbox"/> C <input type="checkbox"/> D
Stimulus 3	<input type="checkbox"/> A <input checked="" type="checkbox"/> B <input type="checkbox"/> C <input type="checkbox"/> D	<input checked="" type="checkbox"/> A <input type="checkbox"/> B <input type="checkbox"/> C <input type="checkbox"/> D	<input type="checkbox"/> A <input type="checkbox"/> B <input type="checkbox"/> C <input checked="" type="checkbox"/> D	<input type="checkbox"/> A <input type="checkbox"/> B <input checked="" type="checkbox"/> C <input type="checkbox"/> D
Stimulus 4	<input type="checkbox"/> A <input type="checkbox"/> B <input type="checkbox"/> C <input checked="" type="checkbox"/> D	<input type="checkbox"/> A <input type="checkbox"/> B <input checked="" type="checkbox"/> C <input type="checkbox"/> D	<input type="checkbox"/> A <input checked="" type="checkbox"/> B <input type="checkbox"/> C <input type="checkbox"/> D	<input checked="" type="checkbox"/> A <input type="checkbox"/> B <input type="checkbox"/> C <input type="checkbox"/> D
...				

3.2 Déroulement de la collecte de données

À l'aide de l'instrument présenté à la section 3.1, les données ont été collectées au cours de l'année scolaire 2011-2012. Pour tous les participants, l'expérimentation s'est déroulée en contexte scolaire, pendant les heures de classe. L'expérimentateur était présenté par l'enseignant des élèves, puis il communiquait brièvement le but de l'expérimentation et détaillait les consignes à l'oral, qui apparaissaient de nouveau à l'écran des élèves au début de la tâche informatisée. L'expérimentation fut entièrement menée en français. Le temps de réaction des élèves pour chaque tâche, ainsi que l'exactitude de leurs réponses, était enregistré pour chacune des trois conditions (stimuli intuitifs, contre-intuitifs et contrôles).

L'expérimentation, d'une durée approximative de trente minutes, s'est toujours déroulée dans un environnement calme (salle de classe ou bibliothèque scolaire). Les locaux, prêtés par des écoles qui nous ont gracieusement permis de procéder à la collecte de données au sein de leurs établissements, étaient relativement tranquilles. Néanmoins, il est possible que les élèves aient été distraits, à l'occasion, par des annonces à l'interphone, par la cloche ou des bruits de l'extérieur.

Un ordinateur portable était placé devant chaque élève, en position assise. L'expérimentateur expliquait à ceux-ci qu'ils devaient d'abord répondre à une tâche de pratique, puis à la tâche scientifique. Cependant, les sujets devaient avant tout, à l'aide du clavier, inscrire leur date de naissance, leur sexe, leur main dominante et leur année scolaire (voir Figure 11), qui étaient enregistrés automatiquement.



Figure 11 : Informations demandées aux sujets

3.2.1 Bloc de pratique

Une fois leurs informations personnelles entrées, l'écran des élèves figeait. L'expérimentateur expliquait alors les détails de la tâche de pratique à l'oral aux élèves et répondait à leurs questions. Notamment, il était précisé aux élèves qu'ils devaient se soucier

de bien répondre, mais également de répondre le plus rapidement possible. Les élèves voyaient ensuite un rappel de ces instructions sur leur écran d'ordinateur, réparties sur quatre diapositives successives (voir Figure 12).

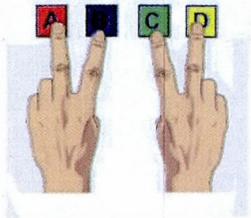
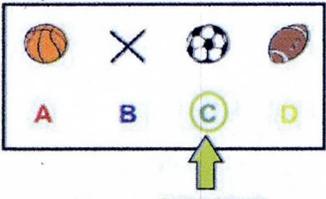
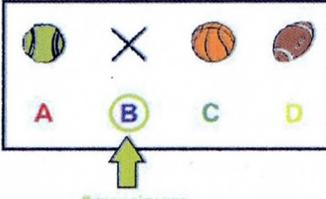
<p>Place tes deux mains ainsi :</p>  <p>1</p> <p>Appuie sur la barre d'espace pour continuer.</p>	<p>Durant la pratique, tu devras répondre à la question suivante :</p> <p><i>Parmi les 3 articles de sport qui te sont présentés, <u>où est le ballon de soccer?</u></i></p>  <p>2</p> <p>Clique sur la barre d'espace pour continuer.</p>
<p><i>Appuie sur la lettre au-dessus de laquelle se trouve le ballon de soccer.</i></p> <p>Exemple :</p>  <p>3</p> <p>Clique sur la barre d'espace pour continuer.</p>	<p><i>Si le ballon de soccer n'apparaît pas, tu devras choisir la réponse X.</i></p> <p>Exemple :</p>  <p>4</p> <p>Clique sur la barre d'espace pour continuer.</p>

Figure 12 : Instructions données d'abord à l'oral, puis affichées à l'écran (pratique)

À la fin de chaque diapositive d'instruction, le participant devait appuyer sur la barre d'espace pour continuer. Après la présentation des instructions, les élèves devaient aussi appuyer sur la barre d'espace pour débiter le bloc de pratique.

3.2.2 Tâche informatisée

Une fois le bloc de pratique terminé, les écrans des élèves figeaient, afin de permettre à l'expérimentateur d'expliquer la tâche scientifique et de répondre à leurs questions. Notamment, il leur était précisé que s'ils considéraient que les trois boules flottaient, ils devaient indiquer qu'aucune boule ne coule plus que les autres («X»). Ensuite, au début de la

tâche, les instructions étaient rappelées aux élèves à l'aide de diapositives, de la même façon que dans le bloc de pratique (voir Figure 13).

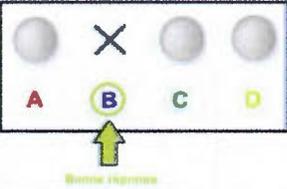
<p>Les images qui suivent présentent toutes 3 boules.</p> <p><i>Ces boules peuvent être faites en :</i></p> <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="text-align: center;">  bois </div> <div style="text-align: center;">  plomb </div> <div style="text-align: center;">  polystyrène </div> </div> <p style="text-align: right; font-size: small;">Clique sur la barre d'espace pour continuer</p>	<p><i>Elles peuvent prendre 3 tailles différentes :</i></p> <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="text-align: center;">  petit </div> <div style="text-align: center;">  moyen </div> <div style="text-align: center;">  gros </div> </div> <p style="text-align: right; font-size: small;">Clique sur la barre d'espace pour continuer</p>
<p>Durant la tâche, tu devras répondre à la question suivante :</p> <div style="text-align: center;">  </div> <p><i>Si les 3 boules étaient déposées dans un bol d'eau, laquelle coulerait davantage ?</i></p> <p style="text-align: right; font-size: small;">Clique sur la barre d'espace pour continuer</p>	<p><i>Si aucune balle ne coule davantage que les autres, tu dois choisir la réponse X.</i></p> <p>Exemple :</p> <div style="text-align: center;">  </div> <p style="text-align: right; font-size: small;">Clique sur la barre d'espace pour continuer</p>

Figure 13 : Informations données d'abord à l'oral, puis affichées à l'écran

3.3 Sources de données

3.3.1 Caractéristiques des sujets

Les 684 sujets de la présente recherche étudiaient tous dans une école publique du Québec, aux deuxième et troisième cycles du primaire, ou au 1^{er} cycle du secondaire. Ils étaient donc âgés entre 8 et 14 ans. Ces niveaux scolaires ont été choisis car l'enseignement du concept de la masse volumique y est vu de manière conceptuelle et non mathématique. Ce n'est en effet qu'à partir de la troisième secondaire que la formule mathématique de la masse volumique est introduite et présentée aux élèves (voir Figure 15). Bien que la masse volumique s'inscrive parmi les savoirs essentiels en sciences et technologie dès le primaire, celle-ci n'y est vue que de façon conceptuelle (voir Figure 14). Avant cet âge, les élèves développent

Comme il est possible de l'observer au tableau 7, sur les 684 sujets, 295 (43,1%) étaient des garçons, alors que 389 (56,9%) étaient des filles. Le seul niveau scolaire pour lequel il y avait plus de sujets masculins que féminins était la 3^e année du primaire. Sur ce même tableau, il est aussi possible de constater que le niveau scolaire pour lequel le plus grand nombre de sujets ont été recrutés est en 5^e année du primaire (64 sujets), et le plus petit nombre en 3^e année du primaire (35 sujets). De plus, on remarque, au Tableau 8, qu'il y avait beaucoup plus de sujets droitiers que gauchers pour chaque niveau scolaire. Au total, 593 sujets droitiers, contre 91 gauchers, ont participé à cette recherche. Par contre, ce pourcentage élevé de droitiers (moyenne de 86,7%) demeure sensiblement le même pour tous les niveaux scolaires (Écart-type = 2,46; Coefficient de variation = 0,028). De plus, ces données correspondent au pourcentage de gauchers et de droitiers dans la population (Peters, Reimers, & Manning, 2006).

Tableau 8 : Distribution des sujets selon le niveau scolaire et la main dominante

		Niveau scolaire du sujet							Total
		3e année primaire	4e année primaire	5e année primaire	6e année primaire	secondair e 1	secondair e 2		
Main dominante	droitier	Effectif % compris dans niveau scolaire	50 83,3%	78 83,0%	126 86,9%	90 88,2%	135 87,7%	114 88,4%	593 86,7%
	gaucher	Effectif % compris dans niveau scolaire	10 16,7%	16 17,0%	19 13,1%	12 11,8%	19 12,3%	15 11,6%	91 13,3%
Total	Effectif % compris dans niveau scolaire	60 100,0%	94 100,0%	145 100,0%	102 100,0%	154 100,0%	129 100,0%	684 100,0%	

3.3.2 Échantillonnage

Les élèves ont été sélectionnés par l'intermédiaire de personnes ressources liées au milieu scolaire (enseignants ou directions). Ces dernières étaient recrutées en fonction de leur intérêt pour le projet, de sorte que l'échantillonnage n'est pas purement aléatoire. Ce recrutement par intérêt était effectué afin de maximiser la taille de l'échantillon. Afin de pallier en partie ce

biais, et d'avoir un échantillon davantage représentatif, un effort a été mis pour recruter des enseignants provenant d'écoles appartenant à des commissions scolaires et des milieux socio-économiques différents. Les sujets proviennent de trois commissions scolaires québécoises et d'écoles dont l'indice de milieu socio-économique (rang décile) varie de 1 à 9 sur une échelle allant de 1 à 10, où le rang 1 est considéré comme le moins défavorisé. (MELS, 2011a),

3.3.3 Exclusions

Il a été nécessaire d'exclure certains des élèves qui ont participé à cette tâche. D'abord, les données de tous les élèves dont le formulaire de consentement n'avait pas été signé ou qui ont refusé de participer à la tâche n'ont, bien entendu, pas été prises en compte dans la recherche, pour des raisons éthiques. De plus, il a été nécessaire d'exclure des analyses les élèves dont certaines données étaient manquantes. Les données provenant d'élèves présentant des troubles du développement particulier (exemple : autisme, dyslexie, etc.) ont toutefois été conservées, puisqu'ils sont intégrés dans des classes régulières et qu'ils sont donc considérés comme faisant partie de la population scolaire régulière. Il est toutefois possible que leur présence induise du bruit dans nos données. Enfin, il est à noter que malgré les exclusions, le nombre de sujets retenus est plus important que toutes les études du genre analysées précédemment à la section des considérations théoriques.

3.4 Considérations éthiques

3.4.1 Consentement

Dans toutes les classes qui ont accueilli cette expérimentation, la participation des élèves était volontaire. Cela signifie que les élèves étaient entièrement libres de ne pas participer ou de mettre fin eux-mêmes à leur participation sans devoir fournir de justification, ni subir de pénalité. Pour les élèves qui se sont abstenus de participer, des exercices leur ont été proposés en classe durant l'expérimentation par l'enseignant responsable du groupe.

Étant donné que les sujets de cette étude n'étaient pas majeurs, un formulaire de consentement, en annexe A, devait être signé à la fois par les élèves et leurs parents. Ce

formulaire explique brièvement l'expérience, et décrit de quelle façon les élèves sont évalués. Les parents pouvaient donc choisir de retirer leur enfant du projet en tout temps. Les données de ces élèves étaient alors effacées.

Enfin, considérant que les sujets étaient recrutés par le biais d'enseignants et de directions qui manifestaient un intérêt pour le projet, les enseignants et les directions des écoles dans lesquelles l'expérimentation s'est déroulée se sont déclarés favorables au projet. Leur accord écrit a malgré tout été obtenu, ainsi que celui de leur conseil d'établissement.

3.4.2 Confidentialité

Il est entendu que les renseignements recueillis lors de la collecte de données en classe sont confidentiels et que seuls les membres de l'équipe de recherche ont accès aux réponses des élèves. Le matériel de recherche (enregistré sur des supports mémoire) ainsi que le formulaire de consentement seront conservés dans les bureaux sous clé du responsable pour la durée du projet. Les formulaires de consentement et les données seront détruits deux ans après la fin du projet.

Enfin, les écoles et les enseignants impliqués dans l'étude ne seront pas identifiés. Ainsi, aucun nom d'établissement scolaire ne sera mentionné dans les communications liées à cette étude, notamment dans la prochaine section du présent mémoire, qui présente et analyse les résultats obtenus à la tâche informatisée.

CHAPITRE IV

RÉSULTATS ET INTERPRÉTATION

L'analyse des résultats qui fait l'objet du présent chapitre traite des données recueillies dans le cadre de l'expérimentation décrite à la section précédente (méthodologie). Des analyses statistiques descriptives, paramétriques et non paramétriques ont été appliquées à ces données comportementales. Dans ce chapitre, les résultats de ces analyses seront présentés et discutés, une fois la méthode d'analyse choisie détaillée.

4.1 Méthode d'analyse des résultats

Les analyses qui ont été effectuées l'aide du logiciel statistique SPSS (Kinnear & Gray, 2011) sont multiples. Toutefois, avant de procéder à leur exécution, les observations manquantes ou extrêmes ont été éliminées, puisqu'elles peuvent induire différents biais (exemple : un temps de réaction très élevé signifie fort probablement que le sujet a dû quitter la classe pendant l'expérience, qu'il a été distrait, ou qu'il ne comprenait pas la tâche). Tel que décrit au chapitre précédent, un total de 684 sujets ont effectué la tâche, chacun d'entre eux devant répondre à 80 stimuli. Ainsi, 54 720 observations ont été réalisées. Cependant, 171 observations, pour lesquelles le temps de réponse dépassait 10 000 millisecondes (ms), ont été rejetées. Le total des observations qui seront soumises à l'analyse est donc de 54 549.

En premier lieu, une analyse descriptive des variables à l'étude sera réalisée. Elle s'articulera de la manière suivante :

- 1) Des statistiques descriptives en lien avec le temps de réaction seront produites (taille de l'échantillon, minimum, maximum, médiane, moyenne, écart-type, coefficients d'asymétrie et de kurtose).
- 2) Un histogramme représentera la distribution des fréquences du temps de réaction et la comparera à une courbe gaussienne.
- 3) Des statistiques descriptives (moyenne, écart-type) en lien avec le temps de réaction seront produites afin de comparer les différentes conditions dans lesquelles les observations ont été faites.

- 4) Des diagrammes en boîte et moustaches, représentant le temps de réaction selon chacun des trois facteurs qui pourraient l'influencer (niveau scolaire, exactitude des réponses, type de stimuli) seront produits.
- 5) Des diagrammes en bâton de la moyenne du temps de réaction en fonction de ces trois facteurs seront réalisés.
- 6) Un graphique de points du temps de réaction des élèves en fonction de leur âge a été produit.

En second lieu, un test de Mann-Whitney a été effectué, afin de déterminer si le type de stimuli et l'exactitude des réponses avait un effet sur le temps de réaction des élèves. Ensuite, un test de Khi-2 permettra de mesurer la relation entre l'exactitude des réponses des élèves devant des stimuli contre-intuitifs et leur niveau scolaire. Enfin, une analyse de corrélation vérifiera si la moyenne du temps de réaction dans ces circonstances est corrélée négativement avec le niveau scolaire des élèves (et donc avec le développement de l'inhibition de ceux-ci). Ces trois analyses devraient permettre de répondre aux objectifs de la présente recherche.

4.2 Résultats

4.2.1 Distribution et moyenne des temps de réaction dans les différentes conditions

Avant même de procéder aux analyses paramétriques et non paramétriques, il s'est avéré utile d'analyser les variables et les données de manière descriptive. Nous nous attarderons donc au temps de réaction des élèves, perçu en secondes au millième près, qui a été mesuré dans différentes conditions chez les sujets dont les caractéristiques ont été présentées au dernier chapitre. D'abord, des statistiques descriptives en lien avec le temps de réaction (Tableau 9) permettent de noter que celui-ci varie au cours des observations, d'un temps minimum de réponse de 4 ms au temps de réaction le plus élevé de 9965 ms. L'écart-type élevé (1121,49) indique que les observations sont assez éloignées de la moyenne, et qu'il y a donc une variation importante entre celles-ci. La moyenne de cette distribution (1682,34 ms) est relativement éloignée de la médiane (1357,00 ms), et on peut donc penser que la distribution de probabilité n'est pas symétrique. D'ailleurs, le coefficient d'asymétrie (2,26) nous montre que le pic de distribution est déplacé vers les valeurs basses. De plus, l'indice d'aplatissement (7,47), aussi appelé coefficient de Kurtose, démontre que le pic de la distribution est assez

prononcé par rapport à la courbe normale. Considérant que le rapport entre ces deux valeurs et leurs erreurs types est plus grand que 2 dans les deux cas, on peut considérer que la distribution du temps de réaction ne suit pas une courbe normale, comme il est d'ailleurs possible de le constater à la Figure 16. Il s'agit plutôt d'une distribution leptokurtique (avec asymétrie positive), dans laquelle les données se concentrent autour d'une valeur centrale d'environ 2000 ms.

Tableau 9 : Statistiques descriptives en lien avec le temps de réaction

Temps de réaction lors de la tâche (ms)		
N	Valide	54549
Moyenne		1682,34
Erreur std. de la moyenne		4,8
Médiane		1367,00
Ecart-type		1121,49
Variance		1257729,07
Asymétrie		2,26
Erreur std. d'asymétrie		,01
Aplatissement		7,47
Erreur std. d'aplatissement		,02
Intervalle		9961
Minimum		4
Maximum		9965

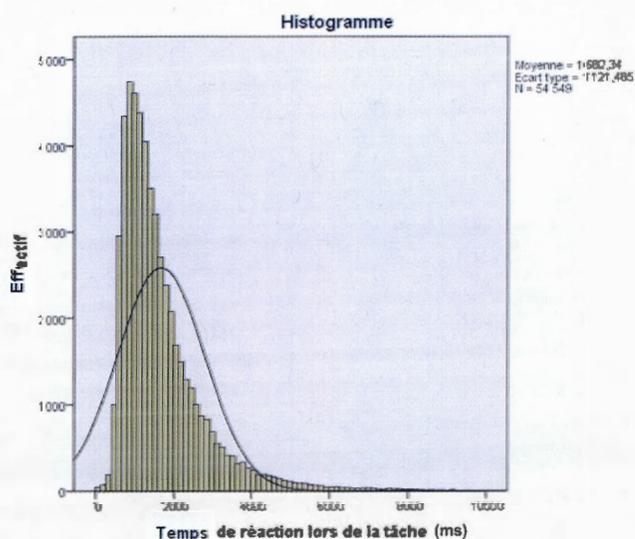


Figure 16 : Histogramme des fréquences du temps de réaction

Dans le but de vérifier les hypothèses de recherche élaborées au deuxième chapitre, il semble pertinent de s'attarder à la moyenne du temps de réaction des étudiants pour chacune des conditions à l'étude. D'abord, l'encadré du Tableau 10 permet d'observer que les élèves qui arrivent à répondre correctement aux stimuli intuitifs (c'est-à-dire ne présentant pas d'interférence intuitive) le font plus rapidement que lorsqu'ils répondent correctement aux stimuli contre-intuitifs (1458,18 ms versus 1910,80 ms). Les écarts-types correspondants sont assez élevés, ce qui annonce une variation importante du temps de réaction.

Tableau 10 : Moyenne du temps de réaction dans les différentes conditions

				Temps de réaction	
				Moyenne	Écart-type
Exactitude des réponses lors de la tâche	Réponse incorrecte	Type de stimulus	contrôle	2002,13	1612,59
			avec interférence intuitive	1750,73	1162,59
			sans interférence intuitive	2013,65	1459,39
	Réponse correcte	Type de stimulus	contrôle	1775,82	995,02
			avec interférence intuitive	1910,80	1221,28
			sans interférence intuitive	1458,18	945,66

Tableau 11 : Moyenne du temps de réaction en fonction de l'exactitude des réponses, du type de stimulus et de l'année scolaire du sujet

				Temps de réaction lors de la tâche					
				Niveau scolaire du sujet					
				3e année primaire	4e année primaire	5e année primaire	6e année primaire	Première secondaire	Deuxième secondaire
				Moyenne	Moyenne	Moyenne	Moyenne	Moyenne	Moyenne
Exactitude des réponses lors de la tâche	Réponse incorrecte	Type de stimulus	contrôle	3235	2215	1556	1646	1529	1381
			avec interférence intuitive	2161	2063	1780	1811	1516	1438
			sans interférence intuitive	2772	2504	2058	1672	1476	1614
	Réponse correcte	Type de stimulus	contrôle	2539	2268	1916	1688	1494	1364
			avec interférence intuitive	2289	2423	2210	1940	1624	1636
			sans interférence intuitive	1814	1749	1554	1503	1275	1196

En observant les encadrés du Tableau 11, dans lequel la variable du niveau scolaire a été ajoutée, il est possible de constater que les élèves de deuxième secondaire sont ceux qui répondent le plus rapidement lorsqu'on leur présente des stimuli intuitifs (1196 ms). De plus, on remarque que lorsque les élèves arrivent à donner la bonne réponse, peu importe leur niveau scolaire, leur temps de réaction est toujours plus élevé pour les stimuli qui présentent des interférences intuitives que pour ceux qui n'en présentent pas. De tels résultats, qui viennent soutenir ceux de Babai *et al.* en mathématiques (2006), suggèrent que les processus de raisonnement des élèves diffèrent selon qu'on leur présente des stimuli intuitifs ou contre-intuitifs. Enfin, on remarque que globalement (toutes conditions confondues), les réponses des élèves sont de plus en plus rapides avec le niveau scolaire; on suppose donc que la vitesse d'exécution ou de raisonnement des élèves augmente avec l'âge. En somme, l'analyse de la moyenne du temps de réaction, aux tableaux 10 et 11, montre qu'elle varie selon les différentes conditions dans lesquelles les observations ont été réalisées, ce qui suggère qu'il existe certaines interactions entre ces facteurs.

Les diagrammes en boîte et moustaches qui suivent (figures 17, 18 et 19) permettent de bien illustrer ces différences. Ces graphiques montrent la présence de plusieurs valeurs extrêmes. Il est possible qu'elles soient dues au fait que certains sujets n'aient pas bien compris la tâche ou aient été distraits. De plus, pour chacun des trois facteurs, la médiane ne semble pas être exactement au milieu de la boîte, ce qui confirme l'asymétrie des données. Enfin, l'étendue interquartile (longueur de la boîte) varie considérablement entre les conditions d'un même facteur : elle est plus élevée chez les jeunes élèves, ainsi que dans les conditions « stimuli contre-intuitifs » et « réponse incorrecte ». On peut interpréter cette variabilité par des degrés de maturation cognitive différents au sein d'un même niveau scolaire chez les plus jeunes et par les interactions entre les deux autres sous-groupes (le temps de réaction devant un type de stimuli peut être influencé par l'exactitude des réponses des élèves, et vice-versa).

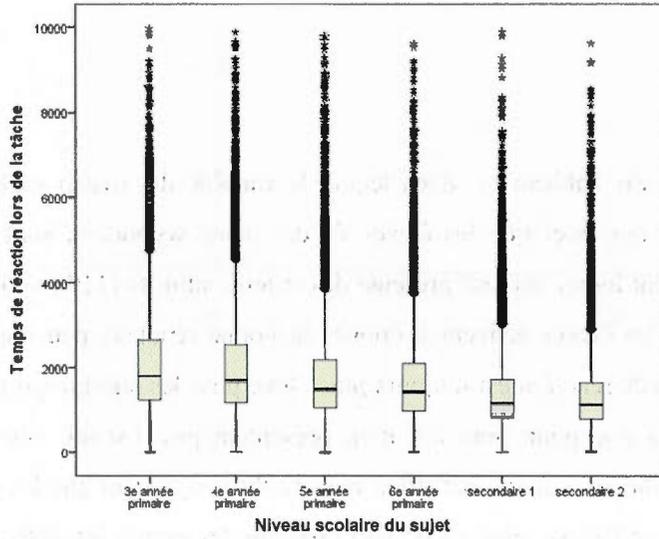


Figure 17 : Diagramme en boîte et moustaches du temps de réaction selon le niveau scolaire

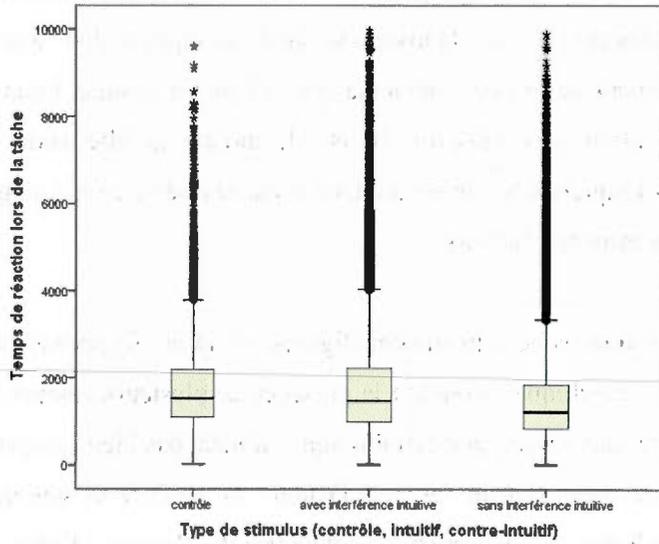


Figure 18 : Diagramme en boîte et moustaches du temps de réaction selon le type de stimulus présenté

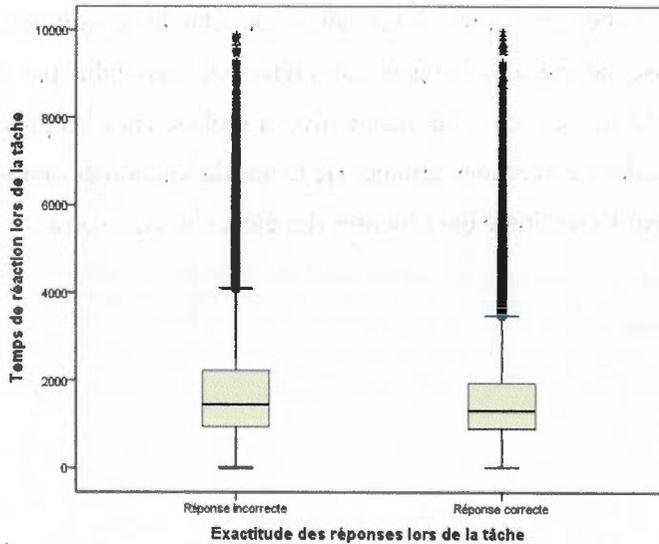


Figure 19 : Diagramme en boîte et moustache du temps de réaction selon l'exactitude des réponses

Le diagramme en bâton (Figure 20) synthétise l'information des trois graphiques en boîte et moustaches. On y présente la moyenne du temps de réaction selon les 2 différentes conditions (exactitude des réponses, type de stimulus), et on compare ensuite les temps de réponses des élèves plus jeunes aux élèves plus âgés. Il est possible d'y constater, encore une fois, que la moyenne du temps de réaction des élèves diminue avec l'augmentation de leur niveau scolaire. Ainsi, le temps de réaction des élèves plus jeunes (3^e année du primaire) est globalement plus élevé que celui des plus vieux (2^e année du secondaire) et ce, peu importe l'exactitude de la réponse donnée ou le type de stimuli présenté. Cette tendance semble aller de pair avec plusieurs études en psychologie développementale qui indiquent que les processus généraux de raisonnement et d'exécution d'une tâche sont plus rapides avec l'âge (exemples : Bunge, Dudukovic, Thomason, Vaidya, & Gabrieli, 2002; Narra, Mathew, & M.V., 2012) et ce, malgré les différences entre les tâches proposées.

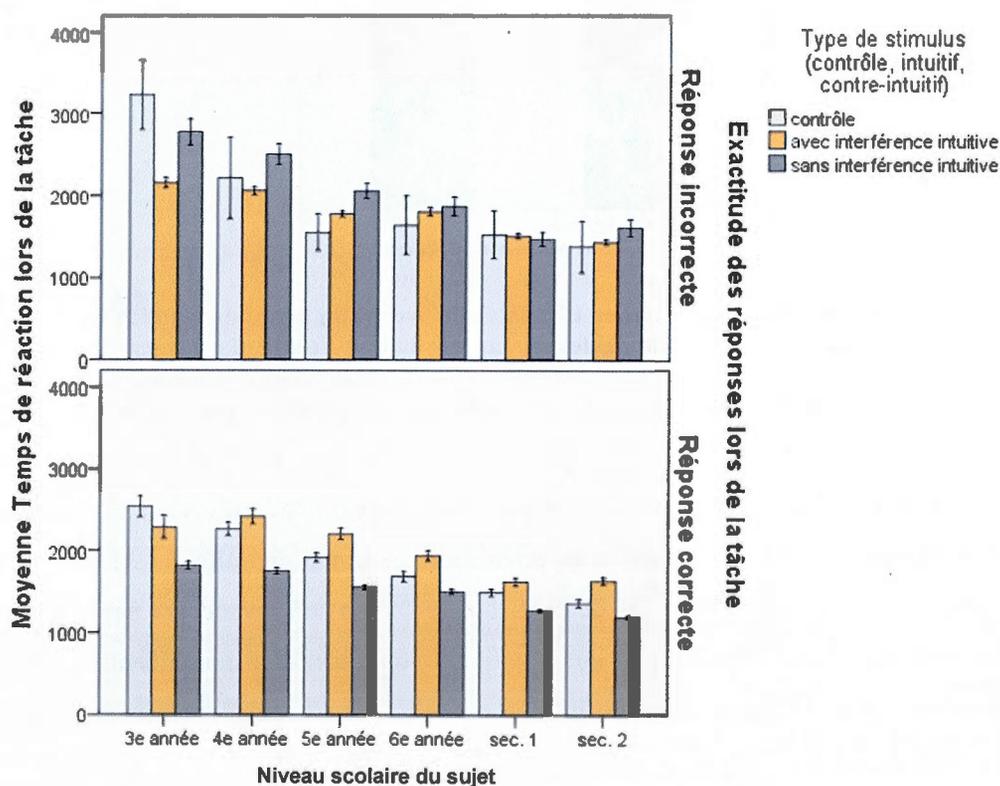


Figure 20 : Diagramme en bâton de la moyenne du temps de réaction en fonction du niveau scolaire, de l'âge et du type de stimulus présenté

Toujours à la figure 21, il est intéressant de comparer les temps de réaction aux stimuli intuitifs et contre-intuitifs en considérant l'exactitude des réponses des élèves. En effet, on remarque que lorsque les individus parviennent à donner des réponses correctes, ils le font plus rapidement pour les stimuli intuitifs que ceux qui sont contre-intuitifs. Lorsque leurs réponses sont erronées, c'est l'inverse : ils répondent plus rapidement aux stimuli contre-intuitifs. Ce patron, qui se répète peu importe le niveau scolaire des élèves, peut être observé encore plus explicitement dans le diagramme en bâton suivant, dans lequel tous les niveaux scolaires sont confondus :

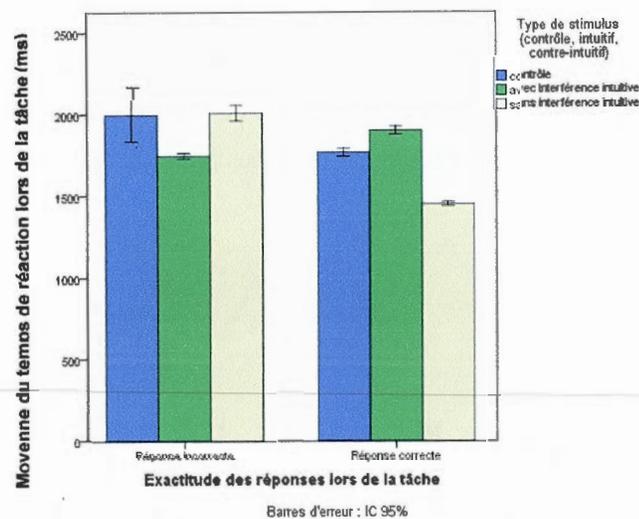


Figure 21 : Diagramme en bâton de la moyenne du temps de réaction en fonction de l'exactitude des réponses et du type de stimulus présenté.

À l'aide de ce diagramme, on constate que les élèves prennent plus de temps à répondre correctement à des stimuli qui présentent des interférences intuitives qu'à ceux qui n'en présentent pas. Ainsi, lorsqu'ils tombent dans le « piège » de l'interférence intuitive, ils le font plus vite que lorsqu'ils répondent incorrectement à des stimuli intuitifs. Il est à noter que dans cette même figure, les intervalles de confiance (95%) ne se chevauchent pas (à l'exception des réponses incorrectes données lors de stimuli contrôles). Par conséquent, il est possible de conclure que la différence entre les différentes conditions est statistiquement significative, ce qui sera confirmé à l'aide d'un test de Mann-Whitney, puis discuté à la section 4.2.2.

Finalement, une analyse graphique du croisement entre les deux variables continues que sont l'âge des élèves et leur temps de réponse a été réalisée. Pour ce faire, un graphique de nuage

de points a été tracé. Puisque l'on désirait aussi savoir si la relation entre l'âge et le temps de réaction reste la même pour les réponses correctes et incorrectes des élèves, ainsi que pour les différents types de stimuli présentés, le graphique (Figure 22) tient également compte de ces sous-groupes de l'échantillon. Bref, ce graphique présente les mêmes informations qu'à la figure 18, mais en substituant la variable catégorielle du niveau scolaire par celle de l'âge.

Sur ce graphique, pour tous les sous-groupes, il est possible de remarquer que les points ne sont pas dispersés au hasard dans le plan, mais qu'ils sont concentrés dans une bande partant de la gauche et descendant légèrement en diagonale jusqu'à la partie inférieure droite. Ce nuage de points en forme de bande oblique nous indique que plus l'âge des élèves augmente, plus leur temps de réaction semble diminuer (plus ils sont rapides) et ce, peu importe s'ils répondent correctement ou non à la tâche. Cette relation linéaire négative avait d'ailleurs déjà été constatée entre le niveau scolaire des élèves et leur temps de réaction. Il était donc attendu de la retrouver ici à nouveau, puisque les variables d'âge et de niveau scolaire devraient varier de façon proportionnelle pour la plupart des élèves. Le test de Khi-2 décrit plus loin dans ce chapitre nous en dira davantage sur cette relation linéaire négative.

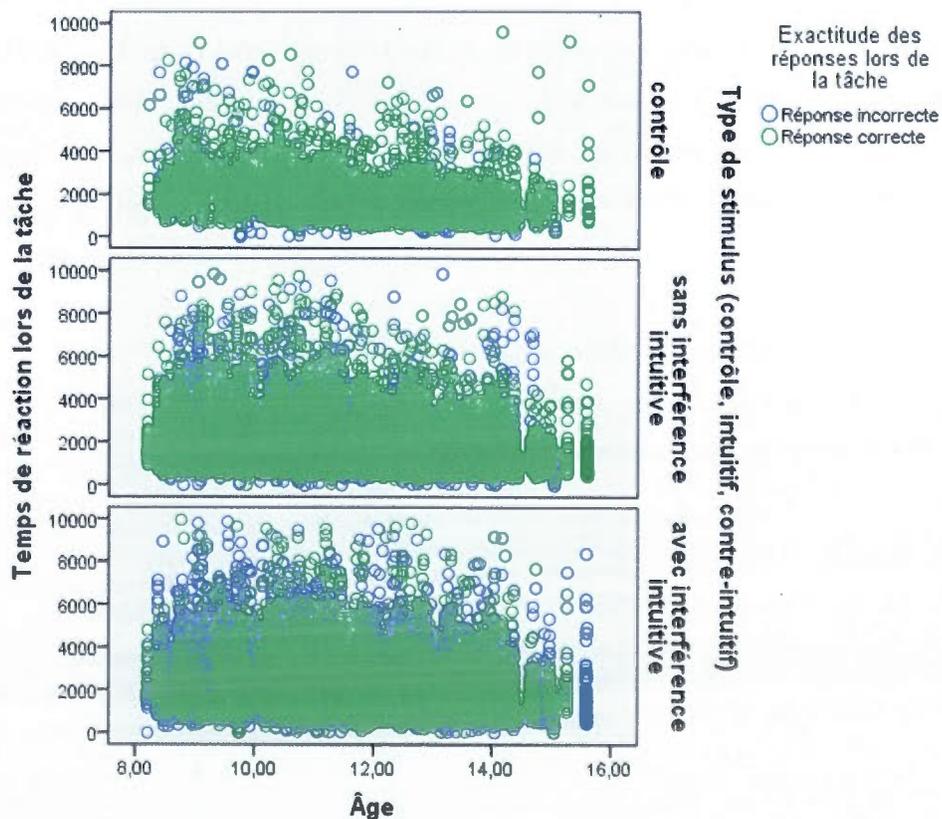


Figure 22 : Graphique en nuage de points de la relation entre l'âge des élèves et leur temps de réaction lors de la tâche selon le type de stimuli et l'exactitude des réponses

4.2.2 Comparaison des temps de réaction aux stimuli intuitifs et contre-intuitifs

Afin de tester la première hypothèse de cette recherche (c'est-à-dire de déterminer si le temps de réaction est élevé lorsque les élèves doivent surmonter des interférences intuitives que lorsqu'ils répondent en lien avec leur intuition), nous avons d'abord envisagé réaliser une analyse de variance. Cependant, avant de procéder à une telle analyse, il faut d'abord s'assurer de l'homogénéité de la variance des différents groupes. Or, la normalité des données a été rejetée avec un test de Levene (voir Tableau 12) qui s'est avéré significatif ($F_{(35,54513)} = 74,483$; $p < 0,05$), comme permettaient d'ailleurs de le prévoir les analyses descriptives réalisées précédemment.

Tableau 12 : Test de l'homogénéité des variances de Levene

Test d'égalité des variances des erreurs de Levene			
Variable dépendante : Temps de réaction lors de la tâche			
F	ddl1	ddl2	p
73,483	35	54684	,000

Par conséquent, nous avons plutôt procédé à deux tests non-paramétriques de Mann-Whitney, qui n'ont pas pour prémisses la normalité des données. En effet, nous avons séparé les réponses incorrectes et les réponses correctes des élèves afin de déterminer si, dans chacune de ces conditions, les élèves répondaient plus rapidement aux stimuli intuitifs que contre-intuitifs. Les hypothèses nulles et alternatives vérifiées par ce test se résument donc ainsi :

- 1) Lorsque les élèves donnent des réponses correctes :

H_0 : Le temps de réaction aux stimuli contre-intuitifs et intuitifs est égal.

H_A : Le temps de réaction aux stimuli intuitifs et contre-intuitifs est différent.

- 2) Lorsque les élèves donnent des réponses incorrectes :

H_0 : Le temps de réaction aux stimuli contre-intuitifs et intuitifs est égal.

H_A : Le temps de réaction aux stimuli intuitifs et contre-intuitifs est différent.

Dans un premier temps, nous avons donc réalisé un test de Mann-Whitney en ne tenant compte que des observations dans lesquelles les élèves parvenaient à donner la bonne réponse. Les résultats de ce test se trouvent aux tableaux 13 et 14:

Tableau 13 : Test de Mann-Whitney comparant le temps de réaction pour les stimuli intuitifs et contre-intuitifs lors de réponses correctes

Rangs				
	Type de stimulus (intuitif, contre-intuitif)	N	Rang moyen	Somme des rangs
Temps de réaction lors de la tâche	avec interférence intuitive	7936	17367,41	1,38E8
	sans interférence intuitive	21029	13394,47	2,82E8
	Total	28965		

Test ^a	
	Temps de réaction lors de la tâche
U de Mann-Whitney	6,055E7
Z	-36,066
Signification asymptotique (bilatérale)	,000

a. Critère de regroupement : Type de stimulus

Le tableau 13 nous renseigne sur le rang moyen pour les deux groupes testés (avec interférence et sans interférence) : il indique que les élèves sont plus rapides à donner des réponses correctes en lien avec leur intuition qu'à surmonter leurs interférences intuitives. On remarque d'ailleurs que beaucoup plus de réponses correctes ont été données aux stimuli intuitifs (21 029) qu'aux stimuli contre-intuitifs (7936), bien qu'il y ait eu autant de stimuli contre-intuitifs et intuitifs présentés aux élèves. Le second tableau nous indique ensuite la valeur du test : avec ces données, il est possible de conclure qu'il existe une différence significative entre les deux groupes. ($U = 60\,550\,000$, $Z = -36,066$, $P = 0,000$), ce qui vient confirmer l'hypothèse alternative présentée plus haut.

Dans un deuxième temps, un test de Mann-Whitney a été produit en ne tenant compte, cette

fois, que des observations dans lesquelles les élèves donnaient des réponses incorrectes. Les résultats de ce test se trouvent aux tableaux suivants :

Tableau 14 : Test de Mann-Whitney comparant le temps de réaction pour les stimuli intuitifs et contre-intuitifs lors de réponses incorrectes

Rangs			
Type de stimulus (intuitif, contre-intuitif)	N	Rang moyen	Somme des rangs
Temps de réaction lors de la tâche	avec interférence intuitive	9900,86	1,64E8
	sans interférence intuitive	10800,79	38180783,00
Total	20117		

Test ^a	
	Temps de réaction lors de la tâche
U de Mann-Whitney	2,669E7
W de Wilcoxon	1,642E8
Z	-8,365
Signification asymptotique (bilatérale)	,000

a. Critère de regroupement : Type de stimulus

Le premier tableau nous indique que les élèves donnent des réponses incorrectes aux stimuli contre-intuitifs légèrement plus rapidement qu'aux stimuli intuitifs. Il est par ailleurs possible de constater que beaucoup plus de réponses incorrectes ont été données aux stimuli contre-intuitifs (16 582) qu'aux stimuli intuitifs (3535), bien qu'il y ait eu autant de stimuli contre-intuitifs et intuitifs présentés aux élèves. Enfin, on peut conclure, à l'aide du second tableau, qu'il existe une différence significative entre les deux groupes. ($U = 26\,690\,000$, $Z = -8.365$, $P = 0.000$), confirmant ainsi la deuxième hypothèse alternative présentée ci-dessus.

Les résultats aux deux tests de Mann-Whitney réalisés ci-dessus permettent de suggérer que les élèves répondent aux stimuli en s'appuyant sur la règle intuitive « plus la taille de la balle est élevée, plus l'objet coulera ». En effet, lorsque les stimuli ne présentent pas d'interférence avec cette règle, leur raisonnement est plus rapide. Si au contraire, la règle intuitive mène à

une conclusion différente de la réponse scientifique attendue, le conflit ainsi créé semble pouvoir être résolu de deux façons : soit en inhibant l'interférence (un processus plus long et demandant) ou soit en donnant une réponse incorrecte basée sur leur intuition (un processus rapide). Dans ce dernier cas, on peut supposer que les élèves s'appuient sur la variable qu'ils sont capables de traiter plus rapidement : ils considèrent donc rapidement la taille des boules (immédiatement et facilement perceptible) sans nécessairement évaluer le matériel dont elles sont faites, et tombent donc dans le piège de l'interférence.

Cette interprétation est similaire à celle proposée par Babai et al. (2006) dans une tâche mathématique. Ces chercheurs laissent aussi entendre qu'il existe vraisemblablement un processus d'inhibition sous-jacent à l'action de surmonter des interférences intuitives en sciences. Selon eux, le succès des élèves qui parviennent à répondre correctement aux stimuli contre-intuitifs est dû au fait qu'ils inhibent leur règle intuitive. Ils suggèrent aussi que les apprenants biaisés qui n'y arrivent pas ne voient probablement pas la nécessité de s'engager dans un tel processus d'inhibition. De telles conclusions pourraient aussi être appliquées à nos données.

4.2.3 Vérification de la relation entre le niveau scolaire des élèves et l'exactitude de leurs réponses aux stimuli contre-intuitifs

L'analyse qui suit aura pour objectif de vérifier la deuxième hypothèse de cette recherche (c'est-à-dire de déterminer si les élèves parviennent mieux à surmonter des interférences intuitives au fil de leur développement). Ainsi, elle ne tiendra que compte des stimuli contre-intuitifs (avec interférence) présentés. Étant donné la non-normalité des données, un test non-paramétrique de Khi-2 a été effectué, utilisé pour tester l'hypothèse nulle d'absence de relation entre deux variables catégorielles. Puisque l'âge des élèves est une variable continue, ce test mesurera donc le lien entre l'exactitude des réponses des élèves et leur niveau scolaire, qui constitue aussi un bon indicateur du développement des élèves. L'hypothèse suivante a donc été vérifiée :

H₀: Il n'existe pas de relation entre l'exactitude des réponses des élèves aux stimuli contre-intuitifs et leur niveau scolaire

H_A: Il existe une relation entre l'exactitude des réponses des élèves aux stimuli contre-intuitifs et leur niveau scolaire

Les tableaux Tableau 15, Tableau 16 et Tableau 17, ainsi que la Figure 23, présentent les résultats au test de Khi-2.

Tableau 15 : Tableau croisé Exactitude des réponses lors de la tâche * Niveau scolaire pour les stimuli contre-intuitifs

		Niveau scolaire du sujet						Total	
		3e année primaire	4e année primaire	5e année primaire	6e année primaire	Première secondaire	Deuxième secondaire		
Exactitude des réponses lors de la tâche	Réponse incorrecte	Effectif	1755	2400	3887	2164	3612	2764	16582
		% compris dans Exactitude des réponses lors de la tâche	10,6%	14,5%	23,4%	13,1%	21,8%	16,7%	100,0%
		% compris dans Niveau scolaire du sujet	82,2%	71,6%	74,7%	59,2%	65,3%	59,6%	67,6%
		% du total	7,2%	9,8%	15,9%	8,8%	14,7%	11,3%	67,6%
	Réponse correcte	Effectif	381	952	1314	1492	1920	1877	7936
		% compris dans Exactitude des réponses lors de la tâche	4,8%	12,0%	16,6%	18,8%	24,2%	23,7%	100,0%
		% compris dans Niveau scolaire du sujet	17,8%	28,4%	25,3%	40,8%	34,7%	40,4%	32,4%
		% du total	1,6%	3,9%	5,4%	6,1%	7,8%	7,7%	32,4%
	Total	Effectif	2136	3352	5201	3656	5532	4641	24518
		% compris dans Exactitude des réponses lors de la tâche	8,7%	13,7%	21,2%	14,9%	22,6%	18,9%	100,0%
	% compris dans Niveau scolaire du sujet	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	
	% du total	8,7%	13,7%	21,2%	14,9%	22,6%	18,9%	100,0%	

Tableau 16 : Test de Khi-deux mesurant le lien entre l'exactitude des réponses des élèves aux stimuli contre-intuitifs et leur niveau scolaire

Tests du Khi-deux			
	Valeur	ddl	Signification asymptotique (bilatérale)
Khi-deux de Pearson	621,118 ^a	5	,000
Rapport de vraisemblance	640,408	5	,000
Association linéaire par linéaire	444,725	1	,000
Nombre d'observations valides	24518		

a. 0 cellules (,0%) ont un effectif théorique inférieur à 5.
L'effectif théorique minimum est de 691,38.

Tableau 17 : Mesures d'associations (Phi et V de Cramer) pour le test de Khi-2

	Valeur	Signification approximée
Nominal par Nominal	Phi	,159
	V de Cramer	,159
Nombre d'observations valides	24518	

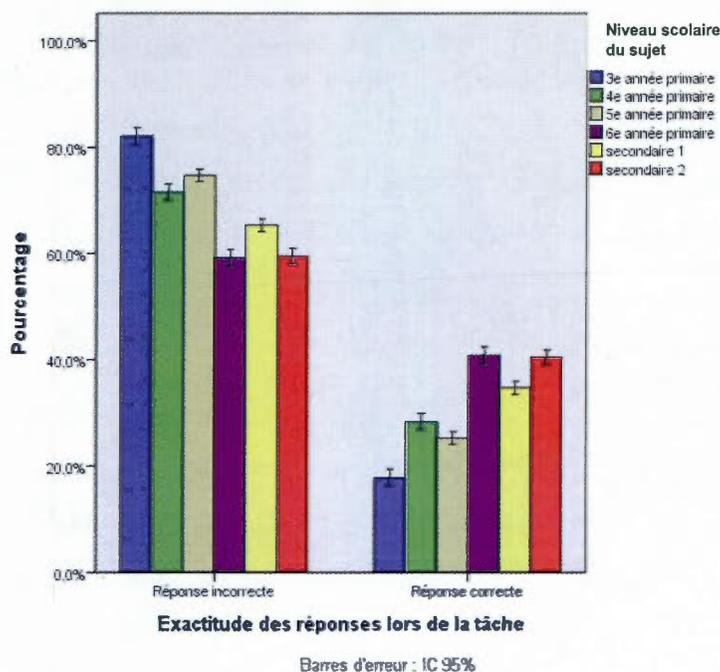


Figure 23 : Diagramme en bâtons de l'exactitude des réponses des élèves aux stimuli contre-intuitifs en fonction de leur niveau scolaire

D'abord, le Tableau 15 nous renseigne sur le pourcentage de réussite des stimuli contre-intuitifs pour chaque niveau scolaire. Bien qu'elle ne soit pas parfaitement linéaire, on y note une importante augmentation de ce pourcentage, qui passe de 17,8% en troisième année à 40,4% en secondaire 2. Le test de Khi-2 significatif (Tableau 16) vient d'ailleurs confirmer qu'il existe bien une relation statistiquement significative entre le niveau scolaire des élèves et l'exactitude de leurs réponses à des stimuli contre-intuitifs. Le Tableau 17 nous indique d'ailleurs la force de cette relation : la statistique de Cramer, avec une valeur de 0,159 (sur une valeur maximale possible de 1) représente une petite association entre les deux variables à l'étude. La valeur du test est toutefois très significative, ($p < 0,01$), de sorte que les chances d'obtenir une valeur de 0,159 par hasard est très faible. Bien que le test de Khi-2 n'indique pas le sens de la relation entre les deux variables, il est possible de constater, à la Figure 23, qu'elle est positive : plus le niveau scolaire d'un élève est élevé, plus il obtiendra de bonnes réponses aux stimuli contre-intuitifs (et moins il obtiendra de mauvaises réponses).

Toujours à la Figure 23, on remarque que le pourcentage de réponses incorrectes semble beaucoup plus élevé que le pourcentage de réponses correctes. Cela signifie que les élèves,

peu importe leur niveau scolaire, éprouvent de la difficulté à surmonter des interférences intuitives. Bref, à partir des résultats au test de Khi-2, on peut supposer que les élèves plus âgés parviennent mieux à inhiber la règle intuitive « plus la taille de la balle est élevée, plus l'objet coulera » que les plus jeunes. La section 4.2.4 nous en dira davantage à ce sujet.

4.2.4 Vérification de la relation entre le temps de réaction aux stimuli contre-intuitifs réussis et l'âge des élèves

Dans cette section, on testera la troisième hypothèse selon laquelle les élèves plus âgés parviendront plus rapidement à surmonter des interférences intuitives avec l'âge. On cherche donc à déterminer l'absence ou la présence d'une relation entre deux variables continues : le temps de réaction aux stimuli contre-intuitifs réussis et l'âge des élèves. Pour ce faire, une analyse de corrélation sera donc effectuée :

H_0 : Il n'existe pas de relation entre l'âge des élèves et leur temps de réaction moyen aux stimuli contre-intuitifs réussis. ($r=0$)

H_A : Il existe une relation entre l'âge des élèves et leur temps de réaction moyen aux stimuli contre-intuitifs réussis.

Cependant, avant de procéder à une telle analyse, il faut d'abord s'assurer de la normalité de la distribution. Or, celle-ci a été rejetée avec un test de Levene plus haut (voir Tableau 12). Cela nous invite donc à la prudence dans l'interprétation des résultats de l'analyse qui suit. Toutefois, considérant que l'échantillon comporte plus de 54 000 observations, l'analyse de corrélation demeurera probablement assez robuste malgré l'hétérogénéité de la variance.

Tableau 18 : Analyse de corrélation entre le temps de réaction et l'âge pour les stimuli contre-intuitifs répondus correctement

		Temps de réaction lors de la tâche	Âge
Temps de réaction lors de la tâche	Corrélation de Pearson	1	-,237**
	Sig. (bilatérale)		,000
	N	7936	7936
Âge	Corrélation de Pearson	-,237**	1
	Sig. (bilatérale)	,000	
	N	7936	7936

** . La corrélation est significative au niveau 0.01 (bilatéral).

Le Tableau 18 nous indique que la corrélation entre les deux variables est significative et négative, ce qui signifie que le temps de réponse des élèves aux stimuli contre-intuitifs réussis diminue au fur et à mesure que leur niveau scolaire augmente. Ainsi, en vieillissant, les élèves parviennent plus rapidement à surmonter des interférences intuitives. Selon les balises fixées par Cohen (1988), la force de cette relation se situerait entre les niveaux faible et moyen, étant donné que le coefficient de relation de Pearson est $r = 0,237$ ($p \leq 0,01$).

En effet, plus le coefficient de relation de Pearson se rapproche de 1, plus les deux variables sont associées fortement et plus il est justifié de rejeter l'hypothèse nulle. Or, pour un grand échantillon comme celui de la présente recherche, un effet même minime suffit à la faire rejeter. Par conséquent, il est donc possible de confirmer la troisième hypothèse de cette recherche, selon laquelle en vieillissant, les élèves parviennent à surmonter des interférences intuitives plus rapidement).

Les considérations théoriques détaillées au chapitre 2, notamment les études qui suggèrent que l'action de surmonter des interférences intuitives est liée à l'activation de mécanismes d'inhibition, et celles qui révèlent que l'âge des élèves est indissociable du développement de leur mécanismes cérébraux d'inhibition, nous permettent de mieux interpréter les résultats décrits plus haut. La littérature présentée au deuxième chapitre nous a en effet permis de constater que la maturation des mécanismes cérébraux liés à l'inhibition avec l'âge suit une relation positive, alors que nos résultats montrent plutôt une relation négative entre l'âge des élèves et le temps de réaction devant des interférences intuitives en sciences. Par contre, les résultats obtenus à la section 4.2.3 indiquaient qu'en vieillissant, les élèves répondent de façon plus exacte aux stimuli contre-intuitifs (relation positive). Puisque les élèves n'ont jamais reçu d'enseignement au sujet de la masse volumique, on peut donc supposer que c'est la maturation de leurs mécanismes d'inhibition qui leur permet de répondre de manière plus rapide et exacte aux stimuli contre-intuitifs. En ce sens, il semble que la maturation des mécanismes d'inhibition des élèves soit liée avec le développement de leur capacité à surmonter des interférences intuitives en lien avec la masse volumique. Le prochain paragraphe tentera de donner une piste d'interprétation possible de ce résultat central de notre recherche.

Bien qu'ils n'aient jamais reçu d'enseignement autour du concept de la masse volumique, il est possible que la plupart des élèves, lors d'expériences diverses ou d'apprentissages implicites, aient découvert la règle intuitive « plus la taille de la balle est élevée, plus l'objet coulera ». Si cette règle leur permet, dans la plupart des cas, d'arriver à un raisonnement scientifiquement correct, ce n'est pas le cas lors d'interférences intuitives. Lorsqu'ils sont devant de telles interférences, nos résultats (section 4.2.1) démontrent qu'ils arrivent rarement à inhiber l'activation d'information ou d'associations non-pertinentes pour la tâche (ici, la grosse balle de plomb) pendant le traitement cognitif. En effet, lorsqu'ils consacrent leur attention uniquement aux variables les plus facilement perceptibles (la taille des balles), sans nécessairement évaluer les autres (matériel dont les balles sont faites), ils tomberont plus souvent dans le piège de l'interférence et donneront une réponse incorrecte. Par contre, s'ils arrivent à inhiber la règle intuitive « plus la taille de la balle est élevée, plus l'objet coulera », ils parviendront peut-être à donner une réponse correcte, mais ce processus exigera plus de temps que de répondre dans le sens de leur intuition (d'où les temps de réaction plus élevés dans ces circonstances).

De plus, peu importe leur âge, les élèves mettent plus de temps à surmonter des interférences intuitives qu'à répondre dans le sens de leur intuition. On remarque cependant qu'en vieillissant, les élèves parviennent de mieux en mieux à surmonter les interférences intuitives (section 4.2.2) et le font en moins de temps (section 4.2.3). De tels résultats pourraient être attribués à une vitesse accrue du traitement de l'information chez les élèves plus âgés, et donc à une diminution du temps nécessaire à la touche du clavier. Toutefois, cette interprétation n'est peut être pas la seule à expliquer la relation entre l'âge des élèves et leur capacité à surmonter des interférences intuitives. La maturation de leurs mécanismes d'inhibition pourrait elle aussi être pointée du doigt : le développement de la capacité à inhiber des élèves pourrait en effet améliorer leurs performances et leur efficacité (temps de réaction) lors de tâches impliquant d'inhiber, comme celle présentée dans la présente recherche. Ainsi, la maturation des mécanismes cérébraux d'inhibition pourrait avoir un rôle à jouer dans le développement de la capacité à surmonter des interférences en sciences.

Selon cette perspective, la règle intuitive « plus la taille de la balle est élevée, plus l'objet coulera » semble donc toujours être présente chez les élèves qui parviennent à surmonter des interférences intuitives. Ils n'ont donc pas nécessairement « effacé de leur cerveau » cette règle apprise implicitement, mais seraient désormais capables de l'inhiber. Par conséquent, il semble que pour réaliser de nouveaux apprentissages en sciences (ou du moins des apprentissages semblables à ceux que teste notre tâche) il ne faudrait pas seulement cumuler de nouvelles connaissances, mais également apprendre à inhiber ses règles intuitives ou connaissances inappropriées.

CHAPITRE V

CONCLUSION

Tel que décrit dans le premier chapitre de cette recherche, la persistance des conceptions initiales erronées des élèves constitue un véritable obstacle à l'enseignement des sciences. En effet, bien que le processus par lequel les élèves parviennent à surmonter leurs idées intuitives ait été fort documenté, il est encore mal compris (diSessa, 2006). Dans ce contexte, la présente recherche avait abordé le problème sous l'angle du rôle de l'inhibition dans le développement de la capacité de surmonter des interférences intuitives en sciences. Pour ce faire, 684 élèves de 8 à 14 ans ont répondu à une tâche informatisée présentant des stimuli intuitifs et contre-intuitifs autour du concept de masse volumique. Leur temps de réaction et l'exactitude de leurs réponses, qui constituaient de bons indicateurs de la présence d'inhibition dans leurs processus de raisonnement, ont ensuite été analysés.

Dans un premier temps, les résultats obtenus à deux tests de Mann-Whitney indiquent que le temps de réaction moyen aux stimuli contre-intuitifs (interférences intuitives) et aux stimuli intuitifs est significativement différent, que les élèves donnent des bonnes réponses ou non. Bien que les deux tests de Mann-Whitney ne permettent pas de déterminer dans quel sens vont les différences entre ces variables, les analyses descriptives effectuées nous permettent de conclure que 1) les élèves mettent plus de temps à répondre correctement aux stimuli présentant des interférences intuitives qu'aux stimuli qui n'en présentent pas, et 2) les élèves donnent des réponses incorrectes aux stimuli contre-intuitifs plus rapidement qu'aux stimuli intuitifs. Ces données, qui confirment celles obtenues par l'équipe de Babai (Babai, Levyadun, et al., 2006) en mathématiques permettent de confirmer notre première hypothèse. De tels résultats signifient probablement que le fait de surmonter une interférence intuitive (l'élève doit alors inhiber sa réponse intuitive) est plus long et demandant que de répondre en lien avec son intuition.

Dans un deuxième temps, un test de Khi-2 a permis d'étudier le lien entre l'exactitude des réponses des élèves et leur niveau scolaire lorsqu'ils répondent à des stimuli contre-intuitifs.

Cette analyse montre que le taux d'exactitude des réponses des élèves augmente au fur et à mesure que leur niveau scolaire grimpe, ce qui vient confirmer la deuxième hypothèse de cette recherche. Les élèves plus âgés arrivent donc mieux à surmonter des interférences intuitives en lien avec la masse volumique.

Dans un troisième temps, une analyse de corrélation a étudié le lien entre le temps de réaction des élèves et leur âge lorsqu'ils parviennent à surmonter des interférences intuitives. Les résultats à cette analyse montrent que lorsque l'âge des élèves augmente (lorsqu'ils vieillissent), leur temps de réaction diminue faiblement (ils sont donc plus rapides à surmonter des interférences). Bien qu'il faille demeurer prudent dans l'interprétation des résultats obtenus à cette analyse de corrélation (l'un des postulats sous-jacents à son utilisation, soit la normalité de la distribution, ne semble pas tout à fait respecté), de tels résultats viennent tout de même confirmer notre troisième hypothèse.

Couplés avec les considérations théoriques du chapitre 2, les résultats aux trois analyses permettent de répondre positivement à l'objectif central de cette recherche : il semble en effet que le développement de la capacité des élèves à surmonter des interférences intuitives en sciences soit lié à la maturation de leurs mécanismes cérébraux d'inhibition. Notons toutefois que l'âge des élèves dissimule souvent l'influence d'autres variables (ex : scolarité, expérience, etc.), et ne peut donc pas être tenu responsable, à lui seul, de la maturation des mécanismes d'inhibition.

6.1 Implications pour la recherche et l'enseignement

Comme il a été permis de le constater tout au long de ce projet de recherche, l'inhibition des interférences intuitives semble jouer un rôle important dans certains processus de changement conceptuel. En effet, pour parvenir à un raisonnement correct, il apparaît nécessaire d'inhiber les stratégies intuitives ou spontanées qui mènent souvent à des réponses erronées. Cette nouvelle perspective de la construction de connaissances scientifiques présente le potentiel d'aider les enseignants de sciences à adapter leurs pratiques de manière à faciliter et favoriser le changement conceptuel chez leurs élèves. En effet, à la lumière de ces résultats, il devient intéressant de se pencher sur le développement d'activités pédagogiques en science qui

permettraient aux élèves d'apprendre à inhiber les interférences intuitives, notamment en dirigeant leur attention sur les variables qui peuvent nuire à leur raisonnement lors de la réalisation de tâches variées. L'étude de Babai et al. en mathématiques (2010) présente d'ailleurs déjà des résultats fort intéressants en ce sens, qui pourraient être appliqués à d'autres domaines comme les sciences.

Enfin, en étant davantage conscients de la complexité du processus cognitif que requièrent les tâches où les élèves doivent surmonter des interférences intuitives, les enseignants pourront mieux choisir les exemples proposés en classe ou juger de la difficulté d'un item dans un examen. En effet, d'après les résultats présentés à la section précédente, il apparaît clair qu'on ne peut évaluer de la même façon un item qui demande de surmonter une interférence intuitive, étant donné les différents mécanismes cérébraux impliqués. En ce sens, la recherche en didactique des sciences pourrait, à notre avis, bénéficier de techniques issues de la psychologie cognitive ou de la neuroéducation. Nous croyons que le recours à de telles méthodologies pourrait permettre de mieux comprendre la façon dont les élèves apprennent, et ainsi parvenir à développer des méthodes d'enseignement qui les aideront à surmonter leurs difficultés.

6.2 Limites et suites de l'étude

La présente recherche est, à notre connaissance, la première à lier le développement de la capacité des élèves à surmonter des interférences intuitives en science avec la maturation de leurs mécanismes d'inhibition. Naturellement, cela implique que les résultats présentés auront besoin d'être reproduits dans de futures études, par exemple en testant la tâche développée sur une tranche d'âge plus large. De plus, les résultats obtenus dans la tâche construite, qui ne présentait que des stimuli en lien avec le concept de masse volumique, devront être généralisés à d'autres tâches en sciences. Cela permettra de vérifier si tous les concepts scientifiques demandent une capacité à inhiber et, si tel n'est pas le cas, ce qui distingue un concept scientifique qui en nécessite d'un autre concept n'en nécessitant pas.

Une analyse longitudinale du raisonnement des élèves, qu'il n'était pas possible ici de réaliser étant donné les contraintes de temps, serait aussi envisageable dans de futures études.

Contrairement à l'approche transversale utilisée dans le cadre de cette expérimentation, cette méthodologie permettrait de réellement mesurer le développement de la capacité des élèves à surmonter des interférences intuitives (et non les différences constatées entre des groupes d'âge différents).

Il serait également intéressant de coupler les résultats quantitatifs obtenus à l'aide de notre instrument avec des réponses qualitatives des élèves. En effet, l'instrument utilisé ne permettait pas des réponses élaborées des élèves, dans lesquelles ils justifiaient leurs choix devant différents types de stimuli. Or, la recherche pourrait vraiment bénéficier de ce genre d'information.

Des études comportementales permettraient aussi d'optimiser les retombées éducatives de cette recherche. Notamment, il serait envisageable de lier la capacité d'inhibition des élèves avec leurs résultats scolaires en sciences. Il serait également possible de reproduire une expérimentation similaire à celle décrite dans ce mémoire, mais en tenant compte du paradigme du *priming* développé en psychologie pour étudier l'inhibition.

Une autre piste pertinente et pour le moins originale serait d'étudier le problème sous l'angle de la neuroéducation afin d'approfondir le rôle des mécanismes d'inhibition et de permettre une meilleure compréhension des processus de raisonnement sous-jacents à l'action de surmonter des interférences intuitives. En effet, il serait pertinent d'utiliser des appareils d'imagerie afin de coupler les résultats comportementaux obtenus avec des résultats cérébraux liés à l'inhibition.

En somme, il apparaît qu'en l'absence de reproduction et de généralisation, les résultats de la présente étude doivent être interprétés avec une certaine prudence. Néanmoins, en ayant ces mises en garde à l'esprit, nous croyons que nos résultats appuient une perspective nouvelle de la construction de connaissances scientifiques, ainsi qu'une validation critique de l'idée que la maturation des mécanismes cérébraux liés à l'inhibition a un effet sur le développement de la capacité des élèves à surmonter des interférences intuitives.

APPENDICE A :



INVITATION À PARTICIPER À UNE RECHERCHE :
FORMULAIRE D'INFORMATION ET DE CONSENTEMENT

**«Étude du temps de réaction et de l'exactitude des réponses des élèves
devant des stimuli contre-intuitifs en sciences»**

Chercheure principale et contact :
Stéphanie Lafortune, étudiante à la maîtrise en éducation, UQAM
Équipe de recherche en éducation scientifique et technologique
514 987-3000 poste 1290 • lafortune.stephanie@courrier.uqam.ca

Chers parents,

En classe, j'ai sollicité la participation de votre enfant à un projet de recherche en éducation. Ce projet, qui reçoit l'appui financier du *Conseil de recherche en sciences humaines du Canada*, a pour objectif d'évaluer la capacité des élèves de 8 à 15 ans à faire face à des concepts contre-intuitifs en sciences. La participation de votre enfant favorisera l'avancement des connaissances dans le domaine de l'enseignement des sciences et permettra, en définitive, d'améliorer la formation et la réussite des élèves. La direction de l'école de votre enfant ainsi que son enseignant ont donné leur accord à ce projet.

Avec votre autorisation et l'accord de votre enfant, il sera invité à réaliser une tâche d'environ 30 minutes sur un ordinateur portable, permettant d'évaluer sa capacité à répondre à des stimuli contre-intuitifs en sciences. La procédure à suivre lui sera détaillée à l'oral en classe. Avec votre autorisation, la performance de votre enfant à cette tâche sera enregistrée par les chercheurs.



La participation de votre enfant à cette recherche est volontaire. Cela signifie que même si vous consentez aujourd'hui à ce que votre enfant participe à cette recherche, il demeure entièrement libre de ne pas participer ou de mettre fin lui-même à sa participation en tout temps et sans devoir fournir de justification, ni de subir de pénalité. Vous pouvez également retirer votre enfant du projet en tout temps. Les données de votre enfant seront alors effacées.

Confidentialité des données

Il est entendu que les renseignements recueillis lors de la collecte de données en classe sont confidentiels et que seuls les membres de l'équipe de recherche auront accès aux réponses de votre enfant. La présente autorisation ne nous permet pas de transmettre les données à de tierces parties. Le matériel de recherche (enregistré sur nos supports mémoire) ainsi que ce formulaire de consentement seront conservés dans les bureaux sous clé du responsable pour la durée du projet. Les formulaires de consentement et les données seront détruits 2 ans après la fin du projet. Évidemment, aucun nom d'établissement scolaire ne sera mentionné dans les communications.

Si vous souhaitez recevoir des renseignements additionnels concernant cette étude, avant de donner votre autorisation ou même après, n'hésitez pas à me contacter. Il me fera plaisir de répondre à vos questions.

AUTORISATION PARENTALE

J'autorise mon enfant (_____) à participer à cette recherche.

Signature du parent: _____ Date : _____

AUTORISATION DE L'ÉLÈVE

Je suis d'accord à participer à cette recherche. (Encercliez.) **Oui** **Non**

Signature de l'élève : _____ Date : _____

Veillez retourner ce formulaire à l'enseignant et conserver les coordonnées du chercheur ou une copie papier de ce document pour référence.

BIBLIOGRAPHIE

- Aoki, T., Francis, P. R., & Kinoshita, H. (2003). Differences in the abilities of individual fingers during the performance of fast, repetitive tapping movements. *Experimental Brain Research*, 152(2), 270-280.
- Astolfi, J.-P., & Develay, M. (2002). *La didactique des sciences*. Paris: Presses universitaires de France.
- Babai, R., & Amsterdamer, A. (2008). The Persistence of Solid and Liquid Naive Conceptions: A Reaction Time Study. *Journal of Science Education and Technology*, 17(6), 553-559.
- Babai, R., Brecher, T., Stavy, R., & Tirosh, D. (2006). Intuitive Interference in Probabilistic Reasoning. *International Journal of Science and Mathematics Education*, 4(4), 627-639.
- Babai, R., Levyadun, T., Stavy, R., & Tirosh, D. (2006). Intuitive rules in science and mathematics: a reaction time study. *International Journal of Mathematical Education in Science and Technology*, 37(8), 913-924.
- Babai, R., 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.
- Balfe, C. A. (2005). Unit 1: Density and Buoyancy : Density, a Fundamental Property of Matter: Concepts, Misconcepts and Difficulties in Teaching and Learning. Retrieved August 2011, from <http://tlc.ousd.k12.ca.us/~acody/densitymisc.html>
- Bedard, A.-C., Nichols, S., Barbosa, J. A., Schachar, R., Logan, G. D., & Tannock, R. (2002). The Development of Selective Inhibitory Control Across the Life Span. *Developmental Neuropsychology*, 21(1), 93-111.
- Benson, D. F., Stuss, D. T., Naeser, M. A., Weir, W. S., Kaplan, E. F., & Levine, H. L. (1981). The Long-term Effects of Prefrontal Leukotomy. *Arch Neurol*, 38(3), 165-169.
- Bêty, M.-N. (2009). *Les principaux modèles de changement conceptuel et l'enseignement des sciences au primaire : état de la question*. Université de Montréal, Montréal.
- Bloom, P., & Weisberg, D. S. (2007). Childhood Origins of Adult Resistance to Science. *Science*, 316(5827), 996-997.
- Botvinick, M. M., Cohen, J. D., & Carter, C. S. (2004). Conflict monitoring and anterior cingulate cortex: an update. *Trends in Cognitive Sciences*, 8(12), 539-546.
- Bunge, S. A., Dudukovic, N. M., Thomason, M. E., Vaidya, C. J., & Gabrieli, J. D. E. (2002). Immature Frontal Lobe Contributions to Cognitive Control in Children: Evidence from fMRI. [doi: 10.1016/S0896-6273(01)00583-9]. *Neuron*, 33(2), 301-311.

- Bunge, S. A., & Zelazo, P. D. (2006). A Brain-Based Account of the Development of Rule Use in Childhood. *Current Directions in Psychological Science*, 15(3), 118-121.
- Burle, B., Vidal, F., Tandonnet, C., & Hasbroucq, T. (2004). Physiological evidence for response inhibition in choice reaction time tasks. *Brain and Cognition*, 56(2), 153-164.
- 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.
- Bussière, P., Knighton, T., & Pennock, D. (2007). La performance des jeunes du Canada en sciences, en lecture et en mathématiques : premiers résultats de 2006 pour les Canadiens de 15 ans. Retrieved from <http://www.pisa.gc.ca/fra/pdf/81-590-f.pdf>
- Cadet, B., & Chasseigne, G. (Eds.). (2009). *Psychologie du jugement et de la décision : des modèles aux applications*. Bruxelles: Éditions De Boeck.
- Carey, S. (1985). *Conceptual Change in Childhood*: MIT Press.
- Carey, S. (2000). Science Education as Conceptual Change. *Journal of Applied Developmental Psychology*, 21(1), 13-19.
- Carey, S., & Bartlett, E. (1978). Acquiring a Single New Word. *Papers and Reports on Child Language Development*, 15, 17-29
- Carruthers, P., Stich, S. P., & Siegal, M. (2002). *The cognitive basis of science*: Cambridge Univ Pr.
- Casey, B. J., Tottenham, N., Liston, C., & Durston, S. (2005). Imaging the developing brain: what have we learned about cognitive development? *Trends in Cognitive Sciences*, 9(3), 104-110.
- Chelune, G. J., & Baer, R. A. (1986). Developmental norms for the wisconsin card sorting test. *Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology*, 8(3), 219-228.
- Chi, M. T. H. (2005). Commonsense conceptions of emergent processes: Why some misconceptions are robust. *The Journal of the Learning Sciences*, 161-199.
- Christ, S. E., White, D. A., Mandernach, T., & Keys, B. A. (2001). Inhibitory Control Across the Life Span. *Developmental Neuropsychology*, 20(3), 653-669.
- Cohen, J. (Ed.). (1988). *Statistical Power Analysis for the Behavioral Sciences*, 2nd ed. Hillsdale, New Jersey: Erlbaum.
- Collectif sous la direction de Patrice Potvin, M. R. e. S. M. (2007). *Regards multiples sur l'enseignement des sciences* (Éditions Multimonde ed.): Éditions Multimonde.
- Dawkins, K. R., Dickerson, D. L., McKinney, S. E., & Butler, S. (2008). Teaching Density to Middle School Students: Preservice Science Teachers' Content Knowledge and Pedagogical Practices. *The Clearing House*, 82(1), 21-26.

- De Neys, W. (2010). Heuristic Bias, Conflict, and Rationality in Decision-Making. In B. Glatzeder, V. Goel & A. Müller (Eds.), *Towards a Theory of Thinking* (pp. 23-33): Springer Berlin Heidelberg.
- De Neys, W., Cromheeke, S., & Osman, M. (2011). Biased but in Doubt: Conflict and Decision Confidence. *PLoS ONE*, 6(1), 1-10.
- 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.
- Dempster, F., & Brainerd, C. (Eds.). (1995). *Interference and inhibition in cognition*. London: Academic Press Limited.
- Dempster, F., & Corkill, A. (1999). Interference and Inhibition in Cognition and Behavior: Unifying Themes for Educational Psychology. *Educational Psychology Review*, 11(1), 1-88.
- Dewar, K. M., & Xu, F. (2010). Induction, Overhypothesis, and the Origin of Abstract Knowledge. *Psychological Science*, 21(12), 1871-1877.
- diSessa, A. A. (1993). Toward an Epistemology of Physics. *Cognition and Instruction*, 10(2/3), 105-225.
- diSessa, A. A. (2006). A History of Conceptual Change Research: Threads and Fault Lines. In R. K. Sawyer (Ed.), *The Cambridge handbook of: The learning sciences*. (pp. 265-281): New York, NY, US: Cambridge University Press.
- Driver, R., Asoko, H., Leach, J., Scott, P., & Mortimer, E. (1994). Constructing Scientific Knowledge in the Classroom. *Educational Researcher*, 23(7), 5-12.
- Duit, R. (2007). Students' and teachers' conceptions in science: A bibliography. Retrieved September 2011, from <http://www.ipn.uni-kiel.de/aktuell/stcse/stcse.html>
- Duit, R., & Treagust, D. F. (2003). Conceptual change: a powerful framework for improving science teaching and learning. *International Journal of Science Education*, 25(6), 671-688.
- Dunbar, K. N., Fugelsang, J. A., & Stein, C. (2007). Do naïve theories ever go away? Using brain and behavior to understand changes in concepts. In M. C. Lovett & P. Shah (Eds.), *Thinking with Data: 33rd Carnegie Symposium on Cognition* (pp. 193-206). Mahwah, NJ: Erlbaum.
- Evans, J. (2006). The heuristic-analytic theory of reasoning: Extension and evaluation. *Psychonomic Bulletin & Review*, 13(3), 378-395.
- Evans, J., Barston, J., & Pollard, P. (1983). On the conflict between logic and belief in syllogistic reasoning. *Memory & Cognition*, 11(3), 295-306.
- Fassoulopoulos, G., Kariotoglou, P., & Koumaras, P. (2003). Consistent and Inconsistent Pupils' Reasoning about Intensive Quantities: The Case of Density and Pressure. *Research in Science Education*, 33(1), 71-87.
- Fischbein, E. (1987). *Intuition in science and mathematics: An educational approach* (Vol. 5): Springer.
- Fugelsang, J. A., & Dunbar, K. N. (2005). Brain-based mechanisms underlying complex causal thinking. *Neuropsychologia*, 43(8), 1204-1213.

- George, R. (2006). A Cross-domain Analysis of Change in Students' Attitudes toward Science and Attitudes about the Utility of Science. *International journal of science education*, 28(6), 571-589.
- Gigerenzer, G. (2005). *I think, therefore I err* (Vol. 72). New York, NY, États-Unis: New School University.
- Giordan, A. (1998). *Apprendre!* Paris: Editions Belin.
- Giordan, A., & De Vecchi, G. (1987). *Les origines du savoir: des conceptions des apprenants aux concepts scientifiques*: Delachaux et Niestlé.
- Gogtay, N., Giedd, J. N., Lusk, L., Hayashi, K. M., Greenstein, D., Vaituzis, A. C., et al. (2004). Dynamic mapping of human cortical development during childhood through early adulthood. *Proceedings Of The National Academy Of Sciences Of The United States Of America*, 101(21), 8174-8179.
- 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.
- Houdé, O., & Guichart, E. (2001). Negative priming effect after inhibition of number/length interference in a Piaget-like task. *Developmental Science*, 4(1), 119-123.
- Houdé, O., Pineau, A., Leroux, G., Poirel, N., Perchey, G., Lanoë, C., et al. (2011). *Functional magnetic resonance imaging study of Piaget's conservation-of-number task in preschool and school-age children: A neo-Piagetian approach* (Vol. 110). Amsterdam, Pays-Bas: Elsevier.
- Houdé, O., Zago, L., Crivello, F., Moutier, S., Pineau, A., Mazoyer, B., et al. (2001). Access to Deductive Logic Depends on a Right Ventromedial Prefrontal Area Devoted to Emotion and Feeling: Evidence from a Training Paradigm. *NeuroImage*, 14(6), 1486-1492.
- Howe, C., Nunes, T., Bryant, P., Bell, D., & Desli, D. (2010). Intensive quantities: Towards their recognition at primary school level. *BJEP Monograph Series II, Number 7-Understanding number development and difficulties*, 1(1), 101-118.
- Kang, S., Scharmann, L. C., & Noh, T. (2004). Reexamining the Role of Cognitive Conflict in Science Concept Learning. *Research in Science Education*, 34(1), 71-96.
- Kemp, C., Perfors, A., & Tenenbaum, J. B. (2007). Learning overhypotheses with hierarchical Bayesian models. *Developmental Science*, 10(3), 307-321.
- Kinnear, P. R., & Gray, C. D. (2011). IBM SPSS Statistics 18 Made Simple. *Hove et New York : Psychology Press*.
- Klingler, E. L. (2006). *Measuring Student Understanding of Density, with Geological Applications*. The University of Maine.
- Klopfer, L. E., Champagne, A. B., & Chaiklin, S. D. (1992). The ubiquitous quantities: Explorations that inform the design of instruction on the physical properties of matter. *Science Education*, 76(6), 597-614.

- 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.
- Kwon, Y. J., Lawson, A. E., Chung, W. H., & Kim, Y. S. (2000). Effect on development of proportional reasoning skill of physical experience and cognitive abilities associated with prefrontal lobe activity. *Journal of Research in Science Teaching*, 37(10), 1171-1181.
- Legendre, M. F. (2002). Le rôle du raisonnement qualitatif dans les processus de changement conceptuel et ses implications pour l'enseignement. In R. M. J. Toussaint (Ed.), *Changement conceptuel et apprentissage des sciences*. Outremont: Éditions Logiques.
- Legendre, M. F. (2007). Enseigner les sciences dans une double perspective de continuité et de rupture. In P. Potvin, M. Riopel & S. Masson (Eds.), *Regards multiples sur l'enseignement des sciences* (pp. 464). Montréal: Éditions MultiMondes.
- Libarkin, J. C., Crockett, C. D., & Sadler, P. M. (2003). Density on Dry Land. *The Science Teacher*, 70 (6), 46-50.
- Margolis, E., & Laurence, E. (1999). *Concept: Core Readings*: The MIT Press.
- Masnick, 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. (2007). Enseigner les sciences en s'appuyant sur la neurodidactique des sciences. In P. Potvin, M. Riopel & S. Masson (Eds.), *Enseigner les sciences: regards multiples* (pp. 308-321). Québec: Éditions MultiMondes.
- Masson, S. (2012). *Étude des mécanismes cérébraux qui sous-tendent les processus de changement conceptuel en sciences*. Unpublished Ph. D. Thesis, Université du Québec à Montréal, Montréal.
- Masson, S., Potvin, P., Riopel, M., Brault Foisy, L.-M., & Lafortune, S. (2012). Using fMRI to study conceptual change : How and why ? *International Journal of Environmental & Science Education*, 7 (1).
- 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.
- Mercier, H., & Sperber, D. (2008). Intuitive and reflective inferences. *In two minds : dual processes and beyond*,
- Milner, B. (1963). Effects of Different Brain Lesions on Card Sorting: The Role of the Frontal Lobes. *Arch Neurol*, 9(1), 90-100.
- Ministère de l'Éducation, d. L. e. d. S. (2009). Progression des apprentissages au primaire : Science et technologie *Programme de formation de l'école québécoise*: Gouvernement du Québec.
- Ministère de l'Éducation, d. L. e. d. S. (2011a). *Indices de défavorisation 2010-2011*.

- Ministère de l'Éducation, d. L. e. d. S. (2011b). Progression des apprentissages au secondaire : Science et technologie *Programme de formation de l'école québécoise*: Gouvernement du Québec.
- Moutier, S., Angeard, N., & Houde, O. (2002). Deductive reasoning and matching-bias inhibition training: Evidence from a debiasing paradigm. *Thinking & Reasoning*, 8(3), 205-224.
- Murphy, K., & Alexandre, P. A. (2008). The Role of Knowledge, Beliefs, and Interest in the Conceptual Change Process : A synthesis and Meta-Analysis of the Research. In S. Vosniadou (Ed.), *International Handbook of Research on Conceptual Change*. New-York: Taylor & Francis.
- Narra, M., Mathew, B., & M.V., S. (2012). Developmental Differences on Cognitive Inhibition in Children and Adults: Evidence from Vigilance Task. *International Journal of Brain and Cognitive Sciences*, 1 (1), 1-5.
- Nathaniel-James, D. A., Fletcher, P., & Frith, C. D. (1997). The functional anatomy of verbal initiation and suppression using the Hayling Test. *Neuropsychologia*, 35(4), 559-566.
- Nussbaum, J., & Novick, S. (1982). Alternative frameworks, conceptual conflict and accommodation: Toward a principled teaching strategy. *Instructional Science*, 11(3), 183-200.
- OECD. (2008). *Encouraging student interest in science and technology studies*. Paris: OECD Publishing.
- Peters, M., Reimers, S., & Manning, J. T. (2006). Hand preference for writing and associations with selected demographic and behavioral variables in 255,100 subjects: The BBC internet study. [doi: 10.1016/j.bandc.2006.04.005]. *Brain and Cognition*, 62(2), 177-189.
- Pettito, L.-A., & Dunbar, K. (2004). New findings from educational neuroscience on bilingual brains, scientific brains, and the educated mind. In K. Fisher & T. Katzir (Eds.), *Building Usable Knowledge in Mind, Brain, & Education*: Cambridge University Press.
- Piaget, J., & Cook, M. (1952). *The origins of intelligence in children*: New York, NY, US: W W Norton & Co.
- Piaget, J., & Inhelder, B. (1974). *The child's construction of quantities*. London: Routledge & Kegan Paul.
- 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(2), 211-227.
- Rand, G., Wapner, S., & McFarland, J. H. (1963). Age differences in performance on the Stroop Color-Word Test. *Journal of Personality*, 31(4), 534-558.
- Roach, L. E. (2001). Exploring students' conceptions of density. *Journal of College Science Teaching*, 30(6), 386-386-389.
- Rowell, J. A., & Dawson, C. J. (1977). Teaching About Floating and Sinking: An Attempt to Link Cognitive Psychology with Classroom Practice. *Science Education*, 61(2), 243-251.

- Schachar, R., & Logan, G. D. (1990). Impulsivity and inhibitory control in normal development and childhood psychopathology. *Developmental Psychology*, 26(5), 710-720.
- Sherrington, C. S. (1906). *The Integrative Action of the Nervous System*. New Haven, CT.: Yale University Press.
- Smith, C., Carey, S., & Wisner, M. (1985). On differentiation: A case study of the development of the concepts of size, weight, and density. *Cognition*, 21(3), 177-237.
- Smith, C., Maclin, D., Grosslight, L., & Davis, H. (1997). Teaching for understanding: A study of students' preinstruction theories of matter and a comparison of the effectiveness of two approaches to teaching about matter and density. *Cognition and Instruction*, 15(3), 317-393.
- Smith, C., Snir, J., & Grosslight, L. (1992). Using Conceptual Models to Facilitate Conceptual Change: The Case of Weight-Density Differentiation. *Cognition and Instruction*, 9(3), 221-283.
- Sowell, E. R., Thompson, P. M., Leonard, C. M., Welcome, S. E., Kan, E., & Toga, A. W. (2004). Longitudinal Mapping of Cortical Thickness and Brain Growth in Normal Children. *The Journal of Neuroscience*, 24(38), 8223-8231.
- Stavy, R., & Babai, R. (2010). Overcoming intuitive interference in mathematics: insights from behavioral, brain imaging and intervention studies. *ZDM*, 42(6), 621-633.
- Stavy, R., Babai, R., Tsamir, P., Tirosh, D., Lin, F.-L., & McRobbie, C. (2006). Are Intuitive Rules Universal? *International Journal of Science and Mathematics Education*, 4(3), 417-436.
- Stavy, R., Goel, V., Critchley, H., & Dolan, R. (2006). Intuitive interference in quantitative reasoning. *Brain Research*, 1073-1074(0), 383-388.
- Stavy, R., & Tirosh, D. (2000). *How students (mis-) understand science and mathematics: Intuitive rules*: Teachers College Pr.
- Stavy, R., Tsamir, P., & Tirosh, D. (2002). Intuitive Rules: the Case of "More A — More B". In M. Limón & L. Mason (Eds.), *Reconsidering Conceptual Change: Issues in Theory and Practice* (pp. 217-231): Springer Netherlands.
- Stupple, E. J. N., & Ball, L. J. (2008). Belief-logic conflict resolution in syllogistic reasoning: Inspection-time evidence for a parallel-process model. *Thinking & Reasoning*, 14(2), 168-181.
- Tamm, L., Menon, V., & Reiss, A. L. (2002). Maturation of Brain Function Associated With Response Inhibition. *Journal of the American Academy of Child & Adolescent Psychiatry*, 41(10), 1231-1238.
- Taylor, J. (Ed.). (1931-2). *Selected Writings of John Hughlings Jackson*. London: Hodder & Stoughton.
- technologie, G. d. Q. C. d. l. s. e. d. l. (2004). *La culture scientifique et technique : une interface entre les sciences, la technologie et la société. Rapport de conjoncture 2004*.

- Thouin, M. (2005). *Notions de culture scientifique et technologique : concepts de base, percées historiques et conceptions fréquentes*. Montréal: Éditions MultiMondes.
- Tirosh, D., & Stavy, R. (1999). Intuitive rules: A way to explain and predict students' reasoning. *Educational Studies in Mathematics*, 38(1), 51-66.
- Tirosh, D., Stavy, R., & Cohen, S. (1998). Cognitive conflict and intuitive rules. *International journal of science education*, 20(10), 1257-1269.
- Tversky, A., & Kahneman, D. (1974). Judgment under uncertainty: Heuristics and biases. *Science*, 185(4157), 1124-1131.
- Uleman, J. S., Kressel, L. M., & Rim, S. (2011). Spontaneous inferences provide intuitive beliefs on which reasoning proper depends. *Behavioral and Brain Sciences*, 34(02), 90-91.
- van den Wildenberg, W. P. M., & Crone, E. A. (2005). Development of response inhibition and decision-making across childhood : a cognitive neuroscience perspective. In J. R. Marrow (Ed.), *Focus on Child Psychology Research*: Nova Science Publishers.
- Vosniadou, S. (1994). Capturing and modeling the process of conceptual change. *Learning and Instruction*, 4(1), 45-69.
- Vosniadou, S., & Brewer, W. F. (1987). Theories of Knowledge Restructuring in Development. *Review of Educational Research*, 57(1), 51-67.
- Wilkening, F., & Cacchione, T. (2010). Children's Intuitive Physics *The Wiley-Blackwell Handbook of Childhood Cognitive Development* (pp. 473-496): Wiley-Blackwell.
- Williams, B. R., Ponesse, J. S., Schachar, R. J., Logan, G. D., & Tannock, R. (1999). Development of inhibitory control across the life span. *Developmental Psychology*, 35(1), 205-213.
- Wundt, W. (1904). In E. Titchener (Ed.), *Principles of Physiological Psychology* (5th ed.). New York: MacMillan.
- Yeend, R., Loverude, M. E., & Gonzalez, B. (2001). *Student Understanding of Density : A Cross-age Investigation*. Paper presented at the Physics Education Research Conference 2001. Retrieved from July 24, 2011, from <http://www.compadre.org/Repository/document/ServeFile.cfm?ID=4313&DocID=1045>