

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL

INFLUENCE DE LA FAMILIARITÉ DES CONCEPTIONS INTUITIVES ET DE LA COMPLEXITÉ DE LEUR
CONCEPT SCIENTIFIQUE CORRESPONDANT SUR LA MOBILISATION DU CONTRÔLE INHIBITEUR
CHEZ DES ÉLÈVES DU SECONDAIRE

MÉMOIRE

PRÉSENTÉ

COMME EXIGENCE PARTIELLE

DE LA MAÎTRISE EN ÉDUCATION (DIDACTIQUE)

PAR

KARÈNE BRINDLE

JUILLET 2024

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.12-2023). Cette autorisation stipule que «conformément à l'article 11 du Règlement no 8 des études de cycles supérieurs, [l'auteur] concède à l'Université du Québec à Montréal une licence non exclusive d'utilisation et de publication de la totalité ou d'une partie importante de [son] travail de recherche pour des fins pédagogiques et non commerciales. Plus précisément, [l'auteur] autorise l'Université du Québec à Montréal à reproduire, diffuser, prêter, distribuer ou vendre des copies de [son] travail de recherche à des fins non commerciales sur quelque support que ce soit, y compris l'Internet. Cette licence et cette autorisation n'entraînent pas une renonciation de [la] part [de l'auteur] à [ses] droits moraux ni à [ses] droits de propriété intellectuelle. Sauf entente contraire, [l'auteur] conserve la liberté de diffuser et de commercialiser ou non ce travail dont [il] possède un exemplaire.»

REMERCIEMENTS

Ce mémoire est le résultat d'un désir de développement professionnel dans le cadre de ma profession d'enseignante de science et technologie au secondaire. Après quelques années d'enseignement dans une école secondaire, la volonté de comprendre, au niveau cognitif, les raisons des difficultés rencontrées par mes élèves m'ont conduite à m'engager dans cette démarche exigeante et inspirante. Je suis extrêmement fière de cet accomplissement ainsi que de toutes les expériences enrichissantes que cette maîtrise m'a permis de vivre.

Tout d'abord, ce projet de recherche, réalisé en même temps qu'enseigner la science et la technologie dans une école secondaire, n'aurait pas pu être possible sans l'aide de mes deux directions de recherche exceptionnelles. Je souhaite exprimer mon immense gratitude envers ma directrice de recherche, Lorie-Marlène Brault Foisy, ainsi que mon co-directeur de recherche, Steve Masson. Ensemble, ils m'ont permis de m'imprégner de l'univers de la recherche en éducation, et surtout, de me dépasser dans la rédaction de mon mémoire. Je les remercie pour leurs précieux conseils, pour leur rigueur apportée à mon travail ainsi que pour leur bienveillance. Je n'aurais pu espérer de meilleurs mentors pour cette étape significative de mon parcours professionnel. De plus, je suis reconnaissante des nombreuses discussions qui ont ensuite engendré différentes réflexions personnelles sur mes pratiques pédagogiques ainsi que sur les difficultés éprouvées par mes élèves. Je les remercie également de m'avoir permis de participer à un congrès de recherche en éducation à Thessaoliniki (Grèce), *Junior Researchers (JURE 2023)*, afin de me développer davantage en tant que professionnel et de vivre une expérience incroyable. Finalement, sachez que la porte de ma classe sera toujours ouverte afin de collaborer à nouveau sur des projets de recherche portant sur l'enseignement des sciences au secondaire.

Je souhaite ensuite remercier d'autres chercheurs rencontrés avec qui j'ai eu la chance de collaborer tout au long de ma maîtrise. Je remercie précieusement Emmanuel Ahr pour son aide apportée, spécialement lors de l'analyse des données collectées. Je suis également très reconnaissante d'avoir eu la chance de participer à un autre projet de recherche avec Patrice Potvin. Finalement, je remercie également mes deux évaluateurs pour leurs précieux conseils, Martin Riopel et Janie Brisson.

Comme ce projet de recherche fait partie d'un autre projet de recherche de plus grande envergure, je souhaite également remercier ma collègue, Élisabeth Bélanger, avec qui j'ai travaillé tout au long du projet.

Bien que ce ne fut pas facile de concorder nos horaires respectifs, ce fut un plaisir de collaborer avec toi, spécialement pour la création des tâches cognitives ainsi que pour la collecte de données.

Je tiens également à remercier les enseignants qui ont accepté de collaborer avec leurs élèves sur ce projet de recherche. Il a été facile de planifier et de réaliser la collecte de données avec vous. Merci également à tous les participants de ce projet de recherche qui ont contribué au développement des connaissances sur l'enseignement des sciences au secondaire.

Je remercie également mes amies qui m'ont soutenu tout au long de la rédaction de mon mémoire. Merci de m'avoir encouragée et de s'être intéressée à mon projet en me questionnant sur celui-ci. Je suis également reconnaissante de votre présence lors des moments où la motivation était plus ou moins présente.

Je souhaite également remercier mes parents, Maryse Blais et Harold Brindle, pour leur rôle durant mon parcours scolaire. Merci de m'avoir donné les outils nécessaires afin de me rendre dans un programme de deuxième cycle universitaire et de pouvoir ainsi réaliser un projet de maîtrise de si grande envergure auprès de grands chercheurs en éducation. Je suis très reconnaissante pour votre soutien apporté tout au long de mon parcours scolaire et de votre foi en mes capacités. L'éducation que j'ai eu la chance d'obtenir est le meilleur cadeau que vous puissiez me donner.

Je souhaite finalement remercier mon copain, Ernesto Motta, pour son soutien apporté tout au long de ma maîtrise. Merci de m'avoir encouragée et de m'avoir poussé à accepter les diverses opportunités offertes malgré la charge de travail immense. Un gros merci pour toute l'aide apportée afin de pouvoir rédiger ce mémoire et de travailler simultanément dans une école secondaire.

DÉDICACE

À tous les enseignant.e.s qui souhaitent approfondir leurs connaissances sur les difficultés des élèves lors d'apprentissages en sciences au secondaire.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS.....	ii
DÉDICACE.....	iv
LISTE DES FIGURES.....	viii
LISTE DES TABLEAUX.....	ix
LISTE DES ABRÉVIATIONS, DES SIGLES ET DES ACRONYMES	xi
LISTE DES SYMBOLES ET DES UNITÉS.....	xii
RÉSUMÉ	xiii
ABSTRACT	xv
INTRODUCTION.....	1
CHAPITRE 1 LA PROBLÉMATIQUE	4
1.1 Les difficultés associées à l'apprentissage des sciences.....	4
1.2 Des conceptions intuitives persistantes chez les élèves du secondaire.....	6
1.3 Des concepts scientifiques complexes	9
1.4 Le contrôle inhibiteur comme mécanisme clé de l'éducation scientifique	11
1.5 La question de recherche	13
1.6 Les incidences possibles	13
CHAPITRE 2 LE CADRE THÉORIQUE.....	15
2.1 Le rôle du contrôle inhibiteur.....	15
2.1.1 Le contrôle inhibiteur au sein des fonctions exécutives	15
2.1.2 La définition du concept du contrôle inhibiteur.....	18
2.1.3 Des exemples d'apprentissages scolaires nécessitant du contrôle inhibiteur	22
2.2 Des indices que différents niveaux de contrôle inhibiteur sont parfois requis.....	24
2.3 Deux variables didactiques susceptibles d'influencer le niveau de contrôle inhibiteur pour des apprentissage en sciences.....	28
2.3.1 La variable didactique <i>familiarité</i>	29
2.3.2 La variable didactique <i>complexité</i>	32
2.4 Les hypothèses de recherche	35
CHAPITRE 3 LA MÉTHODOLOGIE	37
3.1 Les participants.....	37

3.1.1	Les caractéristiques générales des participants sélectionnés	38
3.1.2	Les modalités de recrutement et d'échantillonnage.....	38
3.2	La première phase : l'identification des quatre conceptions intuitives.....	39
3.2.1	Les conditions expérimentales	40
3.2.2	La sélection des quatre conceptions intuitives par des experts.....	40
3.3	La deuxième phase : la création des quatre tâches cognitives.....	50
3.3.1	Le choix de la méthode pour inférer la mesure du contrôle inhibiteur	50
3.3.2	La conception des quatre tâches cognitives.....	54
3.4	La troisième phase : la collecte de données dans une école secondaire	56
3.4.1	Les modalités des visites lors de la collecte de données.....	57
3.5	La quatrième phase : l'analyse des données	58
3.6	Les considérations éthiques	60
CHAPITRE 4 LES RÉSULTATS.....		61
4.1	L'analyse des amorces	61
4.1.1	Les performances	61
4.1.2	Les temps de réponse.....	64
4.1.3	Les effets d'interférence	68
4.2	L'analyse des cibles.....	69
4.2.1	Les performances	69
4.2.2	Les temps de réponse.....	71
4.2.3	L'effet d'amorçage négatif	75
CHAPITRE 5 LA DISCUSSION.....		76
5.1	La discussion sur les amorces	76
5.2	La discussion sur les cibles.....	80
5.3	Le retour sur la question de recherche et sur les hypothèses.....	83
5.4	Les retombées des résultats sur l'avancement des connaissances et sur l'enseignement des sciences au secondaire et d'autres domaines.....	85
5.5	Les limites du projet de recherche et les pistes pour des projets futurs.....	88
CONCLUSION		90
ANNEXE A LES ITEMS DE LA CONDITION EXPÉRIMENTALE 1 (F↓C↓).....		94
ANNEXE B LES ITEMS DE LA CONDITION EXPÉRIMENTALE 2 (F↑C↓).....		95
ANNEXE C LES ITEMS DE LA CONDITION EXPÉRIMENTALE 3 (F↓C↑).....		96
ANNEXE D LES ITEMS DE LA CONDITION EXPÉRIMENTALE 4 (F↑C↑).....		97

ANNEXE E LE FORMULAIRE D'INFORMATION ET DE CONSENTEMENT DESTINÉ AUX PARENTS ET AUX ÉLÈVES 98

ANNEXE F LE FORMULAIRE D'INFORMATION ET DE CONSENTEMENT DESTINÉ AU PERSONNEL ENSEIGNANT 102

ANNEXE G LE FORMULAIRE D'INFORMATION ET DE CONSENTEMENT DESTINÉ AUX DIDACTIENS 105

RÉFÉRENCES..... 108

LISTE DES FIGURES

Figure 3.1 Les scores moyens des huit paires évalués par les experts en didactique des sciences.....	47
Figure 3.2 Un exemple de séquence pour un essai	56
Figure 4.1 Les temps de réponse (ms) des items en amorce en fonction du type d'amorce et des variables didactiques.....	67
Figure 4.2 Les temps de réponse (ms) des items en cible en fonction du type d'amorce et des variables didactiques.....	74

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 3.1 La synthèse des caractéristiques descriptives des 119 participants qui ont complété les quatre tâches cognitives.....	39
Tableau 3.2 Les quatre conditions expérimentales	40
Tableau 3.3 Les huit paires de conceptions intuitives et leur concept scientifique correspondant.....	41
Tableau 3.4 Les valeurs numériques et les définitions des échelles de Likert utilisées lors de l'évaluation de l'indicateur quotidienneté de la variable familiarité.....	42
Tableau 3.5 Les définitions et des exemples pour chaque indicateur permettant aux didacticiens d'évaluer le degré de familiarité d'une conception intuitive.....	43
Tableau 3.6 Les définitions et des exemples pour chaque indicateur permettant aux didacticiens d'évaluer le degré de complexité d'un concept scientifique	45
Tableau 3.7 Les quatre paires formées d'une conception intuitive et de leur concept scientifique correspondant pour chacune des quatre conditions expérimentales	48
Tableau 3.8 La comparaison des scores de familiarité et de complexité des quatre paires sélectionnées	49
Tableau 3.9 Le paradigme d'amorçage négatif.....	53
Tableau 3.10 La synthèse des caractéristiques descriptives des 44 participants qui ont complété les quatre tâches cognitives.....	59
Tableau 4.1 Les performances des items en amorce en fonction du type d'amorce et des variables didactiques.....	62
Tableau 4.2 Les effets d'interaction et les effets principaux de l'ANOVA à mesures répétées des performances en amorce.....	63
Tableau 4.3 Les effets simples de l'ANOVA à mesures répétées du type d'amorce sur les performances en amorce	64
Tableau 4.4 Les temps de réponse (ms) des items en amorce en fonction du type d'amorce et des variables didactiques.....	65
Tableau 4.5 Les effets d'interaction et les effets principaux de l'ANOVA à mesures répétées des temps de réponse en amorce	66
Tableau 4.6 Les effets simples de l'ANOVA à mesures répétées du type d'amorce sur les temps de réponse en amorce	67
Tableau 4.7 Les effets d'interférence en amorce	68

Tableau 4.8 Les performances des items en cible en fonction du type d’amorce et des variables didactiques 70

Tableau 4.9 Les effets d’interaction et les effets principaux de l’ANOVA à mesures répétées des performances en cible 71

Tableau 4.10 Les effets simples de l’ANOVA à mesures répétées du type d’amorce sur les performances en cible 71

Tableau 4.11 Les temps de réponse (ms) des items en cible en fonction du type d’amorce et des variables didactiques..... 72

Tableau 4.12 Les effets d’interaction et les effets principaux de l’ANOVA à mesures répétées des temps de réponse en cible 73

Tableau 4.13 Les effets simples de l’ANOVA à mesures répétées du type d’amorce sur les temps de réponse en cible 74

Tableau 4.14 Les effets d’amorçage négatif en cible..... 75

LISTE DES ABRÉVIATIONS, DES SIGLES ET DES ACRONYMES

ANOVA	Analyse de la variance
ChatGPT	Chat Generative Pre-trained Transformer
CMEC	Le Conseil des Ministres de l'Éducation
COVID-19	Corona Virus Disease appeared in 2019
MELS	Ministère de l'Éducation, du Loisir et du Sport
PFEQ	Programme de Formation de l'École Québécoise
PISA	Programme for International Student Assessment
TIMSS	Trends in International Mathematics and Science Study

LISTE DES SYMBOLES ET DES UNITÉS

↓	Faible
↑	Élevé
C	Complexité
F	Familiarité
MS	Milliseconde
VS	Versus

RÉSUMÉ

La littérature scientifique indique qu'un grand nombre d'élèves éprouvent d'importantes difficultés lors de l'apprentissage des sciences au secondaire. Plusieurs facteurs pouvant être à l'origine de ces difficultés ont d'ailleurs été évoqués dans les écrits scientifiques. Certaines sources de difficulté évoquées sont de nature individuelle alors que d'autres sont liées à l'enseignement. De plus, plusieurs études indiquent que certaines sources de difficulté concernent directement les contenus d'apprentissage. Une première source importante de difficulté est la présence de conceptions intuitives auxquelles adhèrent les élèves qui ne sont pas toujours conformes aux savoirs scientifiques. Une deuxième source de difficulté relève du niveau de complexité des concepts scientifiques. Ceux-ci peuvent être plus ou moins complexes selon différents facteurs tels que le niveau d'abstraction par exemple. La littérature scientifique a également permis de mettre en évidence le rôle du contrôle inhibiteur comme mécanisme cognitif permettant de résister à des conceptions intuitives, lorsque la situation l'exige, afin d'ensuite sélectionner le concept scientifique. Des études suggèrent également qu'il pourrait avoir différents niveaux de contrôle inhibiteur. En effet, des études ont montré que le niveau de mobilisation du contrôle peut parfois varier avec l'âge. De plus, le contrôle inhibiteur serait également un mécanisme cognitif présent chez les experts en sciences. Il pourrait même avoir différents niveaux de mobilisation selon la compétence des élèves. Finalement, d'autres études montrent que le contrôle inhibiteur varie selon le contenu d'une tâche cognitive.

Étant donné que certaines conceptions intuitives apparaissent plus persistantes, possiblement en raison de leur familiarité, et que certains concepts scientifiques apparaissent plus complexes, il apparaît plausible de croire que différents niveaux de contrôle inhibiteur sont probablement requis pour différents contenus d'apprentissage. L'objectif de ce projet de recherche est donc de vérifier l'influence de deux variables didactiques, la *familiarité* des conceptions intuitives et la *complexité* de leur concept scientifique correspondant, sur la mobilisation du contrôle inhibiteur dans l'apprentissage des sciences au secondaire. L'hypothèse générale émise au départ était que le recours au contrôle inhibiteur serait modulé à la fois par le niveau de familiarité de la conception intuitive et par le niveau de complexité du concept scientifique. Ainsi, plus le niveau de familiarité de la conception intuitive est élevé, plus il serait exigeant de résister à l'utilisation de cette conception intuitive et plus le recours au contrôle inhibiteur serait élevé. En outre, plus le degré de complexité du concept scientifique correspondant est élevé, plus l'effort nécessaire à son appréhension et à son éventuelle sélection serait également grand et, conséquemment, plus le recours au contrôle inhibiteur serait élevé.

Pour vérifier ces hypothèses, quatre tâches cognitives ont été construites. Chaque tâche correspond à l'une des quatre conditions expérimentales dont le niveau de familiarité de la conception intuitive et le niveau de complexité du concept scientifique correspondant sont faibles ou élevés. Ainsi, les conditions expérimentales sont les suivantes : 1 (F↓C↓), 2 (F↑C↓), 3 (F↓C↑) et 4 (F↑C↑). Ces quatre tâches cognitives ont été réalisées en utilisant le paradigme d'amorçage négatif. Dans ce paradigme, des paires d'items (amorce et cible) sont présentées successivement aux participants. Dans la condition contrôle, l'amorce est neutre (la conception intuitive n'est ni activée ni inhibée) et la cible est congruente (l'utilisation de la conception intuitive mène à une bonne réponse). Dans la condition test, l'amorce est incongruente (l'utilisation de la conception intuitive ne mène pas à une bonne réponse) et la cible est congruente (l'utilisation de la conception intuitive mène à une bonne réponse). Les performances ainsi que les temps de réponse sont alors comparés entre les deux conditions. L'effet d'amorçage négatif est généralement observé lorsque les temps de réponse sont plus longs pour les conditions test que pour les conditions contrôle. Le paradigme de l'amorçage négatif repose sur le raisonnement suivant : si une information (dans

ce projet, une conception intuitive) est inhibée pour un item donné, l'activation de cette même information pour l'item qui suit immédiatement devrait être plus difficile, ce qui se traduit par de moins bonnes performances et des temps de réponse plus élevés.

Pour les amorces, les résultats montrent que les performances étaient inférieures pour les amorces incongruentes que pour les amorces neutres pour les conditions expérimentales 1 (F↓C↓), 3 (F↓C↑) et 4 (F↑C↑). De plus, les résultats montrent également que les temps de réponse sont plus élevés pour les amorces incongruentes que les amorces neutres pour les conditions expérimentales 1 (F↓C↓) et 4 (F↑C↑). Pour les cibles, les résultats montrent que les performances étaient inférieures pour les cibles suivant une amorce incongruente que les cibles suivant une amorce neutre pour les conditions expérimentales 3 (F↓C↑) et 4 (F↑C↑). De plus, les résultats montrent également que les temps de réponse sont plus élevés pour les cibles suivant une amorce incongruente que les cibles suivant une amorce neutre pour les conditions expérimentales 2 (F↑C↓), 3 (F↓C↑) et 4 (F↑C↑). Cependant, les résultats de l'ANOVA à mesures répétées montrent que le type d'amorce a uniquement une influence significative sur le temps de réponse lorsque la familiarité de la conception intuitive et la complexité du concept scientifique correspondant sont élevées. La mobilisation du contrôle inhibiteur serait donc présente dans la tâche cognitive 4 (F↑C↑) dont les niveaux de familiarité et de complexité sont tous les deux élevés. Il est donc possible de confirmer l'hypothèse que plus le degré de complexité du concept scientifique correspondant est élevé, plus l'effort nécessaire à son appréhension et à son éventuelle sélection serait également grand. Cependant, il n'a pas été possible de confirmer l'hypothèse que plus le niveau de familiarité de la conception intuitive est élevé, plus il serait exigeant de résister à l'utilisation de cette conception intuitive.

Cette recherche fait suite à de nombreuses études réalisées sur l'apprentissage des sciences et sur la mobilisation du contrôle inhibiteur. Tout d'abord, les résultats appuient l'idée que la mobilisation du contrôle inhibiteur est importante dans l'apprentissage des sciences au secondaire. En plus de montrer que le contenu d'apprentissage a une influence sur la mobilisation de cette fonction exécutive, les résultats de ce projet de recherche indiquent que le niveau de complexité d'un concept scientifique influence la mobilisation de cette fonction exécutive. Ainsi, il serait possible d'évaluer la complexité des concepts scientifiques du cursus scolaire afin de connaître ceux qui pourraient demander une mobilisation du contrôle inhibiteur plus grande. En outre, bien qu'il n'a pas été possible de montrer que la familiarité influence le niveau de contrôle inhibiteur, il serait intéressant de vérifier à nouveau son influence dans d'autres tâches cognitives.

Mots clés : science, conception intuitive, familiarité, concept scientifique, complexité, contrôle inhibiteur.

ABSTRACT

Many students experience significant difficulties when learning science in high school. Several factors that may be at the root of these difficulties have been identified in the scientific literature. The sources of these difficulties may be of an individual nature, or may be related to teaching. However, several studies indicate that certain sources of difficulty concern the learning content itself. A first major source of difficulty is the presence of intuitive conceptions held by students, which are not always in line with scientific knowledge. A second source of difficulty is the level of complexity of scientific concepts. These can be more or less complex, depending on various factors such as the level of abstraction. Recently, studies in cognitive psychology and neuroeducation have highlighted the role of inhibitory control as a key mechanism for resisting intuitive conceptions in science and mobilizing the right scientific concepts. The scientific literature also suggests that the level of inhibitory control could vary according to different factors such as age and expertise. Finally, other studies show that inhibitory control varies according to the content of a cognitive task.

Given that some intuitive conceptions appear more persistent, possibly due to their familiarity, and that some scientific concepts appear more complex, it seems logical to believe that different levels of inhibitory control are probably required for different content. The aim of this research project is therefore to verify the influence of two didactic variables, the familiarity of intuitive conceptions and the complexity of their corresponding scientific concept, on the mobilization of inhibitory control in secondary school science learning. The general hypothesis was that the use of inhibitory control would be modulated by both the level of familiarity of the intuitive conception and the level of complexity of the scientific concept. Thus, the higher the level of familiarity of the intuitive conception, the more demanding it would be to resist the use of this intuitive conception, and the more inhibitory control is required. In addition, the greater the complexity of the corresponding scientific concept, the greater the effort required to understand and select it, consequently, the more inhibitory control is mobilized.

To test these hypotheses, four cognitive tasks were constructed. Each task corresponds to one of four experimental conditions with low or high levels of intuitive conception familiarity and corresponding scientific concept complexity. Thus, the experimental conditions are 1 (F↓C↓), 2 (F↑C↓), 3 (F↓C↑) and 4 (F↑C↑). These four cognitive tasks were constructed using the negative priming paradigm. In this paradigm, pairs of items (prime and probe) are successively presented to participants. In the control condition, the prime is a neutral item (the intuitive conception is neither activated nor inhibited) and the probe is a congruent item (the use of the intuitive conception leads to a correct response). In the test condition, the prime is an incongruent item (the use of intuitive conception does not lead to a correct response) and the probe is a congruent item (the use of intuitive conception leads to a correct response). Performance and response times are then compared between the two conditions. The negative priming effect is generally observed when response times are longer for test conditions than for control conditions. The negative priming paradigm is based on the following reasoning: if information (in this project, an intuitive conception) is inhibited in a given item, activation of this information in the item immediately following should be more difficult, resulting in poorer performance and higher response times.

For primes, the results show that performance was lower for incongruent primes than for neutral primes for experimental conditions 1 (F↓C↓), 3 (F↓C↑) and 4 (F↑C↑). In addition, the results also show that response times are higher for incongruent primes than neutral primes for experimental conditions 1 (F↓C↓) and

4 (F↑C↑). For probes, the results show that performance was lower for probes following an incongruent item than probes following a neutral prime for experimental conditions 3 (F↓C↑) and 4 (F↑C↑). In addition, the results also show that response times are higher for probes following an incongruent prime than probes following a neutral prime for experimental conditions 2 (F↑C↓), 3 (F↓C↑) and 4 (F↑C↑). However, the results of the repeated-measures ANOVA show that the prime's type only has a significant influence when the level of familiarity and the level of complexity are high. The mobilization of inhibitory control would therefore be present in cognitive task 4 (F↑C↑). It is therefore possible to confirm the hypothesis that the higher the degree of complexity of the corresponding scientific concept, the greater the effort required to apprehend and possibly select it. However, it was not possible to confirm the hypothesis that the higher the level of familiarity of the intuitive conception, the more demanding it would be to resist using it.

This research builds on numerous studies carried out on science learning and the mobilization of inhibitory control. Firstly, the results support the idea that the mobilization of inhibitory control is important in high school science learning. In addition to showing that learning content has an influence on the mobilization of this executive function, the results of this research project indicate that the level of complexity of a scientific concept influences the mobilization of inhibitory control. In this way, it would be possible to verify the complexity of scientific concepts in the school curriculum in order to identify those that require the mobilization of inhibitory control. Furthermore, although it has not been possible to show that familiarity influences the level of inhibitory control, it would be interesting to check its influence again in other cognitive tasks.

Keywords : science, intuitive conception, familiarity, scientific concept, complexity, inhibitory control.

INTRODUCTION

La science et la technologie contribuent considérablement au développement de la société. Cet apport peut se réaliser autant par le développement de connaissances scientifiques que par le développement et la mise en place de diverses technologies. À titre d'exemple, le développement rapide de l'intelligence artificielle (IA) engendre déjà des changements dans le domaine de l'éducation avec des applications telles que *Chat Generative Pre-trained Transformer (ChatGPT)* (Su et Yang, 2023). La science et la technologie influencent donc directement la vie des êtres humains, et particulièrement, le domaine de l'éducation. En ce sens, les sciences sont donc une discipline en constante évolution selon les multiples découvertes scientifiques et elles permettent notamment de bien comprendre la mise en place ainsi que l'utilisation de diverses technologies dans le domaine de l'éducation. De plus, les sciences sont non seulement comprises dans de nombreux cursus académiques à travers le monde, mais également dans le programme de formation de l'école québécoise (PFEQ, 2001). De ce fait, de nombreuses études s'intéressent à la réussite des élèves dans cette discipline à l'échelle internationale. À titre d'exemple, l'enquête internationale sur les mathématiques et les sciences (TIMSS) est une « évaluation internationale qui mesure les tendances dans le rendement des élèves en mathématiques et en sciences » (CMEC, 2019, p. 1). Elle permet non seulement de collecter des données sur le niveau des élèves dans ces deux disciplines, mais elle permet également de dégager les contextes dans lesquels les élèves sont plus susceptibles de réaliser des apprentissages en sciences. Les nombreux résultats de cette enquête, et ce pour différents pays à travers le monde, montrent que l'apprentissage des sciences semble être difficiles. De ce fait, la littérature scientifique s'intéresse aux sources qui peuvent être à l'origine des difficultés des élèves en science.

Depuis quelques années, un bon nombre d'écrits scientifiques s'intéressant aux difficultés éprouvées par les élèves dans l'apprentissage des sciences utilisent une approche de recherche complémentaire : la neuroéducation. Cette approche permet un « rapprochement entre les neurosciences et l'éducation » (Masson *et al.*, 2017, p. 1) en s'intéressant aux mécanismes cérébraux impliqués dans les apprentissages scolaires et dans l'enseignement. Plusieurs écrits scientifiques en neuroéducation ainsi qu'en psychologie cognitive ont d'ailleurs montré que le contrôle inhibiteur serait essentiel dans l'apprentissage des sciences. Le rôle de ce mécanisme cérébral est de bloquer des automatismes ou des stratégies inefficaces, lorsque cela est nécessaire, afin d'ensuite sélectionner le concept ou la stratégie appropriée à la résolution d'une tâche. En plus d'être indispensable dans l'apprentissage des sciences, des études montrent que le contrôle

inhibiteur est également présent chez des experts en science et que son niveau de mobilisation peut varier selon différents facteurs.

La présente recherche tente de pousser plus loin la compréhension du rôle du contrôle inhibiteur dans l'apprentissage des sciences en évaluant l'influence de deux variables didactiques susceptibles d'influencer le niveau de contrôle inhibiteur requis chez des élèves en quatrième secondaire. Ces deux variables sont qualifiées de « didactiques », car elles concernent spécifiquement des caractéristiques liées aux contenus d'apprentissage. Une première source de difficulté est que les élèves arrivent en classe en possédant diverses conceptions intuitives qui peuvent ou non être conformes aux concepts scientifiques correspondants. Comme ces conceptions intuitives sont persistantes, possiblement en raison de leur familiarité, la première variable didactique à l'étude est donc la familiarité de conceptions intuitives associées à des concepts scientifiques. De plus, les écrits scientifiques indiquent que certains concepts scientifiques peuvent être particulièrement complexes. La deuxième variable didactique à l'étude est donc la complexité des concepts scientifiques. Ces deux variables didactiques seraient susceptibles d'influencer le niveau de contrôle inhibiteur requis. En effet, plus une conception intuitive est familière, plus il pourrait être difficile d'y résister. Qui plus est, plus un concept scientifique serait complexe, plus l'effort nécessaire à son appréhension pourrait être important.

Le premier chapitre de ce mémoire porte sur la problématique de ce projet de recherche. Ce chapitre aborde certaines difficultés associées à l'apprentissage des sciences au secondaire. Par le fait même, les deux variables didactiques associées à ces difficultés y sont détaillées. Il se termine par la question de recherche ainsi que la pertinence scientifique et sociale du projet de recherche. Le deuxième chapitre, le cadre théorique, porte principalement sur le concept central de ce projet de recherche : le contrôle inhibiteur. Le rôle du contrôle inhibiteur sera d'abord présenté. Puis, différents apprentissages demandant sa mobilisation seront présentés. Ensuite, plusieurs études permettant d'indiquer que le niveau de contrôle inhibiteur pourrait varier seront présentées. Il se termine ensuite par la présentation des objectifs et des hypothèses de ce projet de recherche. Le troisième chapitre, la méthodologie, présente d'abord les participants de ce projet de recherche. Il explique et précise aussi la méthode de mesure employée pour inférer la mobilisation du contrôle inhibiteur : l'amorçage négatif. La réalisation des tâches cognitives ainsi que le déroulement de la collecte de données sont également élaborés. Ce troisième chapitre se termine par la présentation des méthodes d'analyse ainsi que les considérations éthiques de ce projet de recherche. Le quatrième chapitre fait état des résultats obtenus suite à l'analyse des données. Le cinquième chapitre,

la discussion, présente d'abord l'interprétation des résultats obtenus de façon à répondre à la question de recherche ainsi qu'à confirmer ou non les hypothèses émises dans le cadre théorique. À la lumière des résultats obtenus, des apports à la pédagogie de l'enseignement des sciences au secondaire et à l'apprentissage des élèves sont aussi présentés. Ce chapitre se termine par les limites de ce projet de recherche. En conclusion, les principaux résultats de cette étude sont présentés afin de mettre en évidence certaines réflexions pouvant mener à de futures recherches.

CHAPITRE 1

LA PROBLÉMATIQUE

Ce premier chapitre permet de présenter la situation générale de l'apprentissage des sciences. Tout d'abord, la littérature scientifique indique que les élèves éprouvent d'importantes difficultés. Ainsi, la première partie fera état des différentes sources à l'origine des difficultés que l'on retrouve dans diverses études. Plusieurs écrits scientifiques présentent également deux sources de difficulté qui seraient reliées directement aux contenus d'apprentissage en science. La première source concerne les conceptions intuitives, en lien avec les contenus d'apprentissage, présentes chez les élèves qui pourraient d'ailleurs être plus ou moins familières. La familiarité des conceptions intuitives, qui est la première variable didactique dans ce projet de recherche, sera donc ensuite expliquée. Puis, la deuxième source concerne le degré de complexité d'un concept scientifique. La complexité d'un concept scientifique, qui est la deuxième variable didactique dans ce projet de recherche, sera par la suite détaillée. De récentes études montrent que le contrôle inhibiteur serait un mécanisme cognitif important dans l'apprentissage des sciences. Il sera donc ensuite expliqué au regard de ces deux variables didactiques. Finalement, la question de recherche sous-tendant ce projet ainsi que ses apports sur les plans scientifiques et sociaux terminent ce chapitre.

1.1 Les difficultés associées à l'apprentissage des sciences

La science est une discipline faisant partie du Programme de formation de l'école québécoise (PFEQ) ainsi que de nombreux cursus scolaires dans différents pays. Ainsi, la littérature scientifique s'intéresse grandement à la réussite des élèves dans cette discipline. Elle indique d'ailleurs qu'un grand nombre d'élèves éprouvent des difficultés importantes lors de l'apprentissage des sciences au secondaire, et ce, partout à travers le monde. À titre d'exemple, les résultats des études de PISA (Programme for International Student Assessment) permettent entre autres de comparer les performances en science des élèves du Canada avec celles d'élèves provenant d'autres pays. À titre d'exemple, les résultats de l'étude de PISA (2018) indiquent qu'« en sciences, environ un élève sur huit au Canada n'a pas atteint le niveau de base attendu, proportion qui a augmenté depuis 2008 » (CMEC, 2018, p. 74). De plus, « le rendement en sciences a connu une baisse statistiquement significative entre 2015 et 2018 dans l'ensemble du Canada » (CMEC, 2018, p. 72). D'autres résultats indiquent que 97 % des élèves atteignent un faible niveau de compétence de base et que seulement 5 % des élèves francophones atteignent un niveau de

compétence élevé en sciences (TIMSS, 2019). De toute évidence, un bon nombre d'élèves ne semblent donc pas atteindre un haut niveau de compétence en sciences.

Puisque les sciences semblent être une discipline dans laquelle plusieurs élèves éprouvent d'importantes difficultés, les écrits scientifiques s'intéressent également aux facteurs pouvant être à l'origine de ces difficultés. Certains des facteurs évoqués sont de nature individuelle. D'abord, l'intérêt des élèves pour les sciences pourrait représenter un premier facteur selon Linnenbrink-Garcia et ses collaborateurs (2011). En effet, les résultats de cette étude indiquent que des sentiments de fatigue, de tension ou même de frustration peuvent conduire à un plus grand désengagement. De tels sentiments peuvent être éprouvés par des élèves en raison de leur parcours académique dans cette discipline. Ainsi, le fait qu'un élève échoue à de nombreuses reprises lors de ses apprentissages en science peut conduire à un manque d'intérêt par celui-ci pour cette matière. Cette situation peut ensuite contribuer à son désengagement dans son apprentissage et ainsi nuire considérablement à sa réussite. Un autre facteur évoqué par Cordova et ses collègues (2014) concerne le sentiment d'auto-efficacité personnelle. Ces chercheurs ont mis en évidence un profil qui serait bénéfique pour l'apprentissage des élèves. Dans ce profil, les élèves doivent d'abord posséder un sentiment de confiance élevé envers leur capacité d'apprentissage en science. De plus, ils doivent croire qu'ils sont prêts et capables de réaliser des situations d'apprentissage portant sur des connaissances scientifiques. Par ailleurs, les résultats montrent aussi qu'un sentiment d'auto-efficacité pourrait également contribuer à augmenter l'intérêt des élèves pour l'apprentissage des sciences. Un troisième facteur évoqué par Broughton et ses collaborateurs (2013) est l'attitude des élèves au regard des sciences. Cette étude montre que certains concepts scientifiques peuvent susciter des émotions négatives chez les élèves et ainsi devenir un obstacle dans leur apprentissage. Cependant, les résultats indiquent que des émotions positives sont prédictives de meilleures attitudes envers les sciences, engendrant ainsi de meilleures réussites.

De surcroît, au-delà de ces facteurs de nature individuelle, la littérature scientifique met également en évidence des facteurs de nature didactique qui concernent le contenu d'apprentissage lui-même. Un premier facteur concerne la présence de conceptions intuitives auxquelles adhèrent les élèves et qui ne sont pas toujours conformes au savoir scientifique (Brault Foisy *et al.*, 2021; Potvin *et al.*, 2015). Ces conceptions intuitives peuvent d'ailleurs être plus ou moins familières selon leur fréquence de mobilisation par les élèves, les conceptions les plus familières étant ainsi susceptibles d'être plus persistantes. Un deuxième facteur se rapporte à la complexité des concepts scientifiques à acquérir qui

ferait en sorte que certains contenus scientifiques pourraient être plus difficiles à maîtriser par les élèves (Toczkowski *et al.*, 2015). Ces deux facteurs de nature didactique pourraient en ce sens nuire à l'apprentissage et ainsi contribuer aux difficultés éprouvées par les élèves du secondaire dans l'apprentissage des sciences. Par ailleurs, un grand nombre d'écrits scientifiques ont déjà répertorié les conceptions intuitives que l'on retrouve le plus fréquemment chez les élèves et démontré la persistance de celles-ci. De plus, certaines de ces études abordent aussi les facteurs pouvant contribuer à la complexité des concepts scientifiques. En somme, ce sont ces facteurs reliés directement aux contenus d'apprentissage, et donc didactiques, qui sont détaillés dans les sections qui suivent.

1.2 Des conceptions intuitives persistantes chez les élèves du secondaire

Un important obstacle à l'apprentissage des sciences est la présence de conceptions intuitives associées à des concepts scientifiques chez les élèves du secondaire. En effet, ces derniers arrivent en classe en possédant diverses conceptions associées aux contenus d'apprentissage du cours de sciences. Certaines de ces conceptions peuvent amener des élèves à répondre correctement à des questions portant sur la science. À titre d'exemple, certains élèves croient que tous les métaux sont attirés par un aimant. Ainsi, ceux-ci pourraient affirmer qu'un objet en fer est attiré par un aimant puisque cette substance fait partie de la catégorie des métaux. La conception intuitive que tous les métaux sont attirés par un aimant leur permet donc de bien répondre à certaines questions portant sur ce sujet. Cependant, ces conceptions ne mènent pas toujours à une bonne réponse dans d'autres situations. En effet, un objet composé d'aluminium n'est pas attiré par un aimant, et ce, même si l'aluminium fait également partie de la catégorie des métaux. Ainsi, la conception intuitive que tous les métaux sont attirés par un aimant ne permet pas de bien répondre à certaines questions portant sur ce sujet. En ce sens, les écrits scientifiques montrent qu'un bon nombre de conceptions seraient donc erronées dans certaines situations, et tenaces, nuisant considérablement à l'apprentissage des élèves (Brault Foisly *et al.*, 2021; Potvin *et al.*, 2015).

Différents termes sont utilisés dans la littérature scientifique afin de qualifier ces conceptions. *Préconceptions*, *conceptions naïves*, *conceptions erronées* et *conceptions initiales* sont les termes qui sont le plus souvent employés (Lafortune *et al.*, 2013; Thouin, 2001). Pour ce projet de recherche, le terme retenu sera *conception intuitive* faisant ainsi référence à la nature spontanée de ces conceptions et au sentiment d'évidence auxquelles elles sont associées. En effet, ces conceptions intuitives peuvent tenter d'expliquer des phénomènes observés au quotidien ainsi que d'établir des liens à partir d'expériences personnelles, du sens commun, des déductions, de vieilles croyances, etc. (Duit et Treagust, 2012).

Plusieurs études ont d'ailleurs déjà répertorié celles que l'on retrouve fréquemment pour différentes disciplines scientifiques. Entre autres, l'ouvrage de Thouin (2015) répertorie de nombreuses conceptions intuitives dans différents domaines scientifiques (la chimie, la physique, l'astronomie, les sciences de la Terre et la biologie). L'étude de Shtulman et Valcarcel (2012) a pour sa part répertorié des conceptions intuitives concernant la matière, la physiologie, l'évolution, la mécanique ainsi que la thermodynamique. De plus, de nombreuses études, notamment celles qui concernent le changement conceptuel (Karous *et al.*, 2022; Potvin *et al.*, 2015) ou le contrôle inhibiteur (Allaire-Duquette *et al.*, 2019, 2021; Brault Foisy *et al.*, 2015, 2021; Potvin *et al.*, 2015), ont sélectionné certaines conceptions intuitives lors de la construction de leurs tâches cognitives.

Par exemple, l'étude de Potvin et ses collaborateurs (2015) s'est intéressée à une conception intuitive dans le domaine de la physique, soit celle selon laquelle les objets lourds coulent et les objets légers flottent. Cette conception intuitive n'est cependant pas conforme au concept scientifique correspondant, puisque la flottaison d'un objet ne dépend pas uniquement de sa masse ou de son volume, mais bien de sa masse volumique. Ainsi, un objet lourd, un bateau par exemple, peut flotter. Bien que sa masse soit élevée, un bateau occupe un très grand volume. Dans le domaine de la physique, l'étude de Brault Foisy et ses collègues (2015) a étudié la conception intuitive selon laquelle une balle lourde tombe plus vite qu'une balle légère. Cette conception s'avère inexacte et est incompatible avec le concept scientifique correspondant puisque l'accélération gravitationnelle est la même pour tous les objets en chute libre sur la Terre. Ainsi, deux balles de masses différentes tombent à la même vitesse en l'absence de la résistance de l'air. Dans le même domaine, Lemmer et ses collaborateurs (2018) se sont intéressés à des conceptions intuitives relatives au magnétisme. L'une de ces conceptions intuitives est que tous les métaux sont attirés par des aimants. Cependant, seulement quatre métaux (le fer, le nickel, le cobalt et le gadolinium) sont magnétiques et donc attirés par des aimants. Ainsi, un objet fait à partir d'or n'est pas attiré par un aimant. L'étude de Babai et Amsterdamer (2008) s'est pour sa part intéressée à des conceptions intuitives liées au modèle particulaire des états de la matière. Selon ce modèle, les substances liquides occupent un volume; elles n'ont pas de forme définie et elles peuvent s'écouler d'un endroit à un autre. Cette dernière particularité contribue à la conception intuitive selon laquelle tous les liquides peuvent être versés. Ainsi, les élèves pourraient considérer des poudres (farine, sable) comme étant des substances liquides puisqu'il est possible de les verser. Cependant, la farine et le sable sont des substances à l'état solide. Un autre exemple de conception intuitive bien documenté porte sur les distances astronomiques du Soleil et de la Lune. Certains élèves pensent que la Lune et le Soleil sont à des distances égales de la Terre, alors que le

Soleil est environ 400 fois plus loin de la Terre que la Lune. Cela peut s'expliquer par le fait que la Terre et la Lune sont de taille semblable dans le ciel du point de vue d'un être humain. Somme toute, un grand nombre de conceptions ont été répertoriées dans plusieurs domaines scientifiques.

En plus de chercher à identifier et répertorier les conceptions intuitives des élèves, d'autres études se sont intéressées à la persistance de celles-ci. À titre d'exemple, l'étude de Brault Foisy et ses collaborateurs (2015) a révélé que certaines conceptions intuitives demeureraient présentes chez des experts en sciences. En effet, les résultats de cette étude montrent une activation importante de régions cérébrales impliquées dans la mobilisation du contrôle inhibiteur afin d'éviter l'utilisation de conceptions intuitives ne menant pas à de bonnes réponses chez des participants experts. Cette étude s'intéressait à la conception intuitive selon laquelle une balle plus lourde tombe plus vite qu'une balle plus légère. Les résultats suggèrent que cette conception intuitive n'aurait donc pas disparu du cerveau des experts en physique, malgré leur utilisation fréquente du concept scientifique stipulant que l'accélération gravitationnelle est la même pour tous les objets sur la Terre. Le mécanisme cognitif du contrôle inhibiteur ainsi que les régions cérébrales qui lui sont associées sont d'ailleurs abordés plus en détail dans la prochaine section.

Différentes études ont également tenté d'expliquer la persistance de ces conceptions intuitives. Une première étude de Shtulman et Valcarcel (2012) suppose qu'un conflit cognitif survient de manière plus importante pour des conceptions intuitives liées à de vieilles connaissances que pour des conceptions intuitives liées à de nouvelles connaissances. En effet, les conceptions liées à de vieilles connaissances seraient plus profondément ancrées dans la mémoire, surtout si elles sont souvent mobilisées ou observables au quotidien. De ce fait, elles seraient également plus familières. Ces résultats permettent donc de proposer que la familiarité d'une conception intuitive pourrait avoir une influence sur la capacité des élèves à surmonter cette conception intuitive pour ensuite mobiliser le bon concept scientifique correspondant. À ceci s'ajoutent les résultats de l'étude de Brault Foisy et ses collègues (2015) qui explique que certaines conceptions intuitives seraient persistantes parce qu'elles sont familières, notamment en étant observables fréquemment au quotidien. Par exemple, concernant la conception intuitive sur la chute de deux objets de masses différentes citée dans la section précédente, il est possible de voir tomber des objets de masses différentes dans la vie de tous les jours. Cependant, ces objets étant soumis à la résistance de l'air, les observations qui en découlent ne correspondent pas au concept scientifique. Ainsi, ces conceptions intuitives provenant de l'observation et du sens commun peuvent être erronées. Bien qu'une plume tombe moins vite qu'une boule de quilles, en raison de la résistance de l'air, ne correspond

pas, en apparence, au concept scientifique que tous les objets sont soumis à la même accélération gravitationnelle sur la Terre. En ce sens, elles représentent souvent des systèmes d'explication suffisamment fonctionnels au quotidien. C'est entre autres pour cette raison que les conceptions intuitives peuvent persister malgré un enseignement formel et être difficiles à surmonter (diSessa, 2004).

Les éléments mentionnés dans les paragraphes précédents soulignent donc que les élèves arrivent en classe avec de nombreuses conceptions intuitives qui ne correspondent pas, dans certaines situations, au concept scientifique correspondant. En plus d'être souvent erronées, elles seraient également persistantes. Le degré de familiarité de ces conceptions intuitives pourrait en ce sens avoir une incidence sur la persistance de ces dernières. De plus, les écrits scientifiques ont également identifié une autre source à l'origine des difficultés des élèves, soit la complexité des concepts scientifiques. Cette deuxième source de nature didactique est détaillée dans la prochaine section.

1.3 Des concepts scientifiques complexes

Une deuxième source importante de difficulté propre aux contenus d'apprentissage serait liée à la complexité de concepts scientifiques. Certains apprentissages scientifiques présentent en effet un haut niveau de complexité, et ce, pour différentes raisons. D'abord, les concepts scientifiques présentent différents degrés d'abstraction, ce qui peut augmenter leur niveau de complexité. En effet, des modèles et des analogies sont fréquemment utilisés afin d'expliquer et de schématiser certains concepts scientifiques qui présentent un haut niveau d'abstraction (Lemmer *et al.*, 2018). Bien que ces analogies aident à mieux comprendre certains concepts scientifiques, la correspondance avec le concept scientifique ne sera malheureusement jamais totale. En effet, il y aura toujours « des aspects non pertinents et celui qui apprend n'a pas le moyen de différencier ce qui est pertinent de ce qui ne l'est pas » (Richard, 1990; Michel et Sperandio, 1996). En ce sens, une étude de Toczowski et ses collaborateurs (2015) indique que différentes formules moléculaires peuvent être mal interprétées par les élèves et que certains modèles de particules ne correspondent pas à des représentations symboliques adéquates. De plus, ces concepts scientifiques (les formules moléculaires) utilisent une terminologie complexe ou inhabituelle. Ceci augmente donc considérablement le niveau de difficulté dans l'apprentissage de ce contenu.

Dans le même ordre d'idées, la compréhension de certains concepts scientifiques peut dépendre des capacités visuospatiales des élèves. Par exemple, des concepts scientifiques en minéralogie demandent aux élèves de se représenter mentalement des modèles. Une étude a d'ailleurs révélé que la visualisation

spatiale est une compétence importante dans l'apprentissage de la minéralogie et qu'une difficulté importante dans cet apprentissage est de passer d'une image en trois dimensions à des représentations en deux dimensions (Ozdemir, 2010). Cette compétence additionnelle peut ainsi contribuer à la complexité d'un concept scientifique.

D'autre part, certains concepts scientifiques exigent pour être compris que les apprenants maîtrisent d'autres concepts scientifiques afin d'ensuite les mettre en relation. Par exemple, le concept de masse volumique demande aux élèves de comprendre deux concepts scientifiques différents, soit celui de la masse et celui du volume. Lorsque ces deux premiers concepts ne sont pas bien maîtrisés, il est alors difficile de comprendre le nouveau concept, soit la masse volumique. Ainsi, le nombre d'éléments devant être traités simultanément dans la mémoire de travail peut être élevé, ce qui est susceptible de contribuer à créer une surcharge cognitive. Un haut niveau de charge cognitive augmente alors la complexité d'un concept scientifique. À ce sujet, une étude réalisée par Gulucar et Fynewever (2010) porte sur la résolution d'un problème de stœchiométrie en chimie. Cette étude a d'abord répertorié les sous-problèmes tels que l'écriture d'une équation thermochimique, la conservation de la masse, le concept de mole, les formules moléculaires, etc. Ces nombreux concepts scientifiques requis pour résoudre un seul problème montrent bien que la quantité d'éléments dans la mémoire de travail peut être très élevée. Cette situation peut donc contribuer également à la complexité d'un concept scientifique.

Un autre élément augmentant la complexité serait la nécessité de mettre en place un raisonnement multiniveau. Par exemple, certains concepts scientifiques peuvent être abordés au niveau microscopique ainsi qu'au niveau macroscopique. L'étude d'Irawansyah et ses collègues (2018) s'intéressant à la température permet de bien illustrer cette idée. Ce concept scientifique ne peut être perçu par les yeux, c'est-à-dire qu'il est impossible d'observer l'agitation des particules. Il peut alors être difficile de s'imaginer des éléments qui ne sont pas perceptibles par nos sens, ce qui exige un travail d'abstraction. Cependant, il est possible de la ressentir, de la mesurer ou de la calculer et, ainsi, d'observer ce concept au niveau macroscopique.

Un dernier élément pouvant contribuer à la complexité d'un apprentissage fait référence aux nombreux concepts interdisciplinaires nécessaires pour résoudre un problème. Cet élément est la nécessité de recourir à des relations mathématiques pour comprendre certains concepts scientifiques. Les élèves doivent donc non seulement résoudre des problèmes en utilisant différents concepts scientifiques, mais

ils doivent également utiliser diverses relations apprises dans leur cours de mathématiques (Salta et Tzougraki, 2011).

Il apparaît donc que plusieurs éléments peuvent augmenter la complexité d'un concept scientifique et ainsi contribuer aux difficultés des élèves dans l'apprentissage des sciences au secondaire. Étant donné la difficulté des élèves à délaisser leurs conceptions intuitives et familières au profit de connaissances plus valables du point de vue scientifique, des recherches ont tenté d'étudier les mécanismes cognitifs permettant de contribuer à faire évoluer les conceptions intuitives (Allaire-Duquette *et al.*, 2019). L'un des mécanismes mis en lumière notamment par Brault Foisy et ses collaborateurs (2021) est le contrôle inhibiteur. Ce mécanisme est présenté dans la section suivante.

1.4 Le contrôle inhibiteur comme mécanisme clé de l'éducation scientifique

Le contrôle inhibiteur, ou inhibition, est un processus cognitif qui permet de résister à un raisonnement intuitif (Masson, 2014) ou à un automatisme (Houdé, 2014). Au niveau cérébral, le contrôle inhibiteur réfère à la désactivation d'un réseau de neurones par un autre réseau de neurones (Masson, 2012). D'ailleurs, des études ont permis de cibler les régions cérébrales associées au contrôle inhibiteur. Ces régions cérébrales sont notamment le cortex cingulaire antérieur, le cortex préfrontal ventrolatéral ainsi que le cortex préfrontal dorsolatéral. Elles seraient davantage activées lors de la réalisation d'une tâche qui nécessite de mobiliser le contrôle inhibiteur (Masson, 2012). Des études en psychologie cognitive et en neuroéducation ont également permis de mettre en évidence le rôle du contrôle inhibiteur comme mécanisme permettant de résister à des conceptions intuitives, lorsque la situation l'exige (Allaire-Duquette *et al.*, 2019). Lors de la récupération en mémoire de concepts scientifiques, les régions cérébrales associées au contrôle inhibiteur permettraient ainsi de résister à certaines conceptions intuitives afin de mobiliser le concept scientifique correspondant qui permet de produire une réponse scientifiquement juste (Allaire-Duquette *et al.*, 2019).

Le contrôle inhibiteur serait donc non seulement essentiel dans l'apprentissage des sciences, mais également dans l'apprentissage pour d'autres domaines tels que les langues et les mathématiques. Par exemple, l'étude de Lanoë et ses collègues (2016) indique que le contrôle inhibiteur est requis dans la réalisation d'une tâche en grammaire. Dans cette tâche, les participants doivent inhiber un automatisme afin d'appliquer correctement les règles d'orthographe grammaticale. Une autre étude, en mathématiques cette fois-ci, montre que des élèves doivent avoir recours au contrôle inhibiteur dans la

résolution de problèmes écrits. En effet, les élèves doivent inhiber un automatisme associé au vocabulaire employé dans la formulation du problème afin d'effectuer une opération permettant d'arriver à la bonne réponse (Lubin *et al.*, 2013). Une autre étude de Houdé (2011) a également mis en évidence le rôle de l'inhibition dans une tâche de conservation du nombre. Dans cette tâche, les participants doivent résister à l'utilisation d'un automatisme (plus la rangée est longue, plus il y a de jetons) en comparant deux rangées de jetons. Dans le domaine des sciences, Allaire-Duquette et ses collègues (2019) ont mis en évidence le rôle du contrôle inhibiteur dans la compréhension des concepts scientifiques incongruents. De plus, cette étude a permis de mettre en évidence que les élèves qui réussissaient le mieux en science étaient ceux qui activaient davantage les régions cérébrales associées au contrôle inhibiteur. Ce résultat indique donc que le niveau de contrôle inhibiteur pourrait ainsi varier, dans ce cas-ci, entre les élèves d'un même groupe d'âge.

Par ailleurs, d'autres études récentes suggèrent que le besoin de contrôle inhibiteur varierait également selon la nature du contenu scientifique abordé (Brault Foisy *et al.*, 2021; Skelling-Desmeules *et al.*, 2021). Par exemple, le niveau de contrôle inhibiteur requis pour résister à une conception intuitive très familière pourrait possiblement être plus important que pour une conception intuitive moins familière, qui a été renforcée moins fréquemment. Il apparaît également plausible que le niveau de contrôle inhibiteur requis puisse également varier en fonction de la complexité du concept scientifique qui doit être sélectionné. En effet, plus un concept scientifique est complexe, plus le raisonnement que l'élève doit mobiliser est associé à une charge cognitive importante. Ainsi, plus un concept scientifique est complexe, plus son appréhension serait exigeante et moins il serait susceptible d'être mobilisé par l'élève.

Compte tenu de ce qui précède, la littérature scientifique indique que le contrôle inhibiteur pourrait parfois être nécessaire tout au long de l'apprentissage des sciences, mais que le niveau de contrôle inhibiteur requis pour réussir la tâche demandée pourrait varier. Il pourrait ainsi parfois être davantage requis et mobilisé en début d'apprentissage, et parfois de manière plus égale tout au long de la vie. De plus, étant donné que certaines conceptions intuitives apparaissent plus persistantes, possiblement en raison de leur familiarité élevée, et que certains concepts scientifiques apparaissent plus complexes, il apparaît plausible de croire que différents niveaux de contrôle inhibiteur sont probablement requis pour différents contenus d'apprentissage. Or, à notre connaissance, aucune étude n'a à ce jour cherché à évaluer les variables susceptibles d'influencer le niveau de contrôle inhibiteur requis. Il apparaît en ce sens pertinent de chercher à mieux identifier ces variables. Pour ce faire, un point de départ intéressant

pourrait être de s'intéresser aux deux variables didactiques qui ont été discutées précédemment et qui sont déjà bien documentées dans la littérature, mais qui n'ont jamais été explicitement mises en lien avec le contrôle inhibiteur, soit la **familiarité** des conceptions intuitives et la **complexité** des concepts scientifiques.

1.5 La question de recherche

La littérature scientifique indique qu'un grand nombre d'élèves vivent d'importantes difficultés dans l'apprentissage des sciences (TIMSS, 2019), notamment en raison des contenus d'apprentissage. En effet, la littérature scientifique révèle que les élèves détiennent de nombreuses conceptions intuitives susceptibles de faire obstacle à leur apprentissage des sciences au secondaire (Babai et Amsterdamer, 2008; Brault Foisy *et al.*, 2015, 2021; Potvin *et al.*, 2015; Shtulman et Valcarcel, 2012; Thouin, 2015). Par ailleurs, plusieurs études ont montré que certaines conceptions intuitives ne disparaissent pas et que leur persistance pourrait différer selon leur niveau de familiarité (Brault Foisy *et al.*, 2021). En plus des conceptions intuitives, la complexité des contenus scientifiques à apprendre pourrait également contribuer aux difficultés des élèves dans l'apprentissage des sciences au secondaire (Iramansych *et al.*, 2018; Lemmer *et al.*, 2018; Toczowski *et al.*, 2015). Certains concepts scientifiques demandant une charge cognitive importante pourraient influencer la mobilisation de ceux-ci par les élèves. Considérant que le mécanisme cognitif permettant de résister aux conceptions intuitives afin d'ensuite sélectionner le concept scientifique adéquat serait le contrôle inhibiteur (Allaire-Duquette *et al.*, 2019; Brault Foisy *et al.*, 2021) et qu'à notre connaissance, aucune étude ne s'est encore intéressée spécifiquement aux variables didactiques susceptibles d'influencer le recours au contrôle inhibiteur, ce projet vise à vérifier pour la première fois si les variables didactiques *familiarité* et *complexité* peuvent contribuer à expliquer pourquoi certains apprentissages nécessitent de faire preuve d'un plus grand niveau de contrôle inhibiteur que d'autres.

La question de recherche sous-tendant ce projet est donc la suivante : est-ce que la familiarité des conceptions intuitives et la complexité de leur concept scientifique correspondant influencent le niveau de contrôle inhibiteur nécessaire lors d'apprentissages scientifiques au secondaire?

1.6 Les incidences possibles

D'abord, les incidences de cette recherche permettront de faire suite aux nombreuses études réalisées sur les conceptions intuitives ainsi que celles réalisées sur le rôle du contrôle inhibiteur dans l'apprentissage

des sciences. En effet, cette recherche permettra d'aller au-delà du constat que le contrôle inhibiteur joue un rôle clé dans l'apprentissage des sciences. En ce sens, les résultats de cette recherche permettront de préciser le rôle de deux variables didactiques sur le niveau de mobilisation du contrôle inhibiteur, ce qui n'a pas encore été réalisé jusqu'à maintenant. De plus, la portée des résultats découlant de ce projet est susceptible d'aller au-delà du contexte québécois, car les difficultés associées à l'apprentissage des sciences ont été documentées dans le cadre de nombreuses études dans différents pays à travers le monde.

Sur le plan social, les résultats pourront conduire à des réflexions didactiques concernant l'enseignement des sciences au secondaire. Si les résultats indiquent que les deux variables didactiques influencent les niveaux de mobilisation du contrôle inhibiteur, les enseignants pourraient ensuite classer les différents concepts scientifiques du cursus scolaire selon leur degré de complexité ainsi que le degré de familiarité des conceptions intuitives qui leur sont associées. Pour ce faire, plusieurs indicateurs sont présentés dans le cadre théorique. Cette éventuelle classification de certains contenus d'apprentissage en sciences au regard des deux variables didactiques pourrait aider les enseignants de mieux cerner et de mieux prévenir les difficultés des élèves dans la planification et dans la conception de situations d'enseignement et d'apprentissage. Puis, si les résultats montrent par exemple qu'un haut niveau de complexité d'un concept scientifique demande une importante mobilisation du contrôle inhibiteur, des réflexions sur la mise en place de stratégies pouvant favoriser l'activation de ce mécanisme devront être réalisées.

CHAPITRE 2

LE CADRE THÉORIQUE

La première section présente le concept central de cette recherche, soit le contrôle inhibiteur. Pour ce faire, les fonctions exécutives sont d'abord expliquées afin de situer le contrôle inhibiteur au sein de celles-ci. Puis, les mécanismes cognitifs du contrôle inhibiteur, et par conséquent, les méthodes pour mesurer le contrôle inhibiteur dans différentes tâches sont présentés. Les exemples d'apprentissages nécessitant du contrôle inhibiteur complètent cette première section sur le concept fondamental de ce projet de recherche. La deuxième section de ce chapitre discute de l'idée qu'il existe différents niveaux de contrôle inhibiteur. Les résultats de différentes études qui montrent que le contrôle inhibiteur peut être plus ou moins important selon l'âge, selon l'expertise ainsi que selon les contenus d'apprentissage sont présentés. La troisième section présente plus en détail les deux variables didactiques susceptibles d'influencer le niveau du contrôle inhibiteur, soit la familiarité des conceptions intuitives et la complexité des concepts scientifiques. Le chapitre se termine par la présentation des hypothèses de recherche.

2.1 Le rôle du contrôle inhibiteur

Le chapitre précédent a montré que le contrôle inhibiteur est nécessaire dans certaines situations afin de résister à des conceptions intuitives auxquelles adhèrent les élèves pour ensuite mobiliser le bon concept scientifique correspondant (Allaire-Duquette *et al.*, 2019; Brault Foisy *et al.*, 2021). Cette fonction exécutive qui sera étudiée dans le cadre de ce projet de recherche est donc expliquée en détail dans les sections suivantes.

2.1.1 Le contrôle inhibiteur au sein des fonctions exécutives

Le contrôle inhibiteur, ou l'inhibition, fait partie d'un ensemble de processus cognitif que plusieurs auteurs appellent *fonctions exécutives*. À cet égard, plusieurs auteurs proposent des définitions de ce qu'est une fonction exécutive. À titre d'exemple, les fonctions exécutives peuvent aussi être appelées « le contrôle cognitif » (Diamond *et al.*, 2007). Elles sont des « processus cognitifs de haut niveau, souvent associés au lobe frontal, qui contrôlent les processus de bas niveau au service d'un comportement dirigé vers un but » (Friedman et Miyake, 2017, p. 186). En outre, ces processus cognitifs, ou fonctions exécutives, sont variés selon Collette et Angel (2015) :

Les travaux en neuropsychologie et psychologie cognitive qui se sont intéressés à la structure du fonctionnement exécutif ont mis en évidence que ce terme générique regroupe en réalité un ensemble de processus variés, dont les plus fréquemment décrits sont les capacités de planification et de résolution de problèmes, la flexibilité, la mise à jour, l'inhibition et la coordination des tâches doubles (p. 288).

Les auteurs ne s'entendent pas tous sur l'identification précise des fonctions exécutives; un débat conceptuel subsiste en effet quant aux distinctions et à l'interaction entre celles-ci. Cependant, trois fonctions exécutives centrales semblent davantage mises en évidence par plusieurs chercheurs parmi toutes les fonctions exécutives identifiées dans la littérature scientifique. La première est la mémoire de travail. Cette première fonction exécutive permet de maintenir en tête des informations et de les manipuler lors de l'accomplissement d'une tâche. Selon Thibault, Tapin et Tissier (2017), la mémoire de travail est composée de deux mécanismes :

La mémoire de travail est responsable de la gestion de la mémoire à court terme. Deux mécanismes sont souvent utilisés pour la décrire : le stockage et la mise à jour. Alors que le stockage décrit la capacité d'un individu à maintenir l'information assimilée dans sa mémoire à court terme, la mise à jour, ou *updating*, fait quant à elle référence à la capacité d'un individu à manipuler le contenu ainsi stocké (Miyake *et al.*, 2000). [...] La mise à jour se définit quant à elle comme étant la capacité à mettre à jour le contenu de sa mémoire de travail, que ce soit en manipulant l'information qu'elle contient ou en y ajoutant ou retirant des éléments. (p. 255-256)

Ainsi, les régions cérébrales associées à la mémoire de travail pourraient récupérer un concept scientifique dans la mémoire à long terme afin de l'utiliser dans la mémoire à court terme lors de la réalisation d'une tâche précise. À titre d'exemple, des élèves doivent récupérer des connaissances antérieures associées aux forces lorsqu'ils appliquent la deuxième loi de Newton dans un cours de physique en cinquième secondaire (MELS, 2011). En d'autres mots, la mémoire de travail est « l'espace mental permettant de rendre présentes à l'esprit les connaissances antérieures et d'établir des liens avec de récentes connaissances » (Masson, 2020). La deuxième fonction exécutive est la flexibilité cognitive. Cette fonction permet de passer d'une tâche à une autre et elle est notamment liée à la troisième fonction exécutive, le contrôle inhibiteur. Selon Thibault, Tapin et Tissier (2017), la flexibilité cognitive, ou flexibilité mentale, est définie comme :

La flexibilité mentale, ou *shifting*, peut être définie comme étant la capacité à changer de tâche ou de stratégie mentale, une compétence particulièrement impliquée lors d'une tâche de résolution de problèmes. La flexibilité renvoie donc à la capacité d'adapter ses choix aux contingences de la tâche. (p. 259)

La troisième fonction exécutive est donc le contrôle inhibiteur, ou inhibition. Cette fonction exécutive permet de résister à des automatismes (Houdé, 2014) afin de sélectionner et de mobiliser des conceptions ou des stratégies pertinentes, lorsque la situation l'exige. Thibault, Tapin et Tissier (2017) décrivent le contrôle inhibiteur, ou inhibition, comme :

L'inhibition est la fonction exécutive qui permet de résister aux habitudes ou aux automatismes ainsi que de s'adapter à des situations complexes à l'aide de la flexibilité mentale (Diamond, 2013; Houdé, 2000, 2014; Houdé et Borst, 2014). Pour ce faire, elle agit de différentes façons, permettant la suppression des réponses inappropriées, la résistance aux interférences ou encore le blocage de l'information non pertinente (Bjorklund et Harnishfeger, 1995). (p. 257)

À cet égard, différents modèles tentent d'expliquer les relations entre ces trois fonctions exécutives. Les résultats de certaines études suggèrent d'abord que les trois fonctions exécutives seraient à la fois distinctes et reliées (Miyake, 2000; Miyake et Friedman, 2012). En effet, chaque fonction exécutive est associée à un mécanisme cognitif qui permet à une personne d'atteindre un but précis. Cependant, il est parfois nécessaire de mobiliser un autre processus cognitif afin d'atteindre ce but. À titre d'exemple, il a été mentionné que le contrôle inhibiteur permet de résister à des automatismes afin de mobiliser une autre stratégie. Pour ce faire, la flexibilité cognitive permet entre autres de passer de l'automatisme à l'autre information. Ces différents modèles mettent non seulement en évidence la place du contrôle inhibiteur au sein des fonctions exécutives, mais ils montrent également que le contrôle inhibiteur serait essentiel dans la réalisation de tâches associées aux autres fonctions exécutives. Le contrôle inhibiteur serait ainsi nécessaire dans l'apprentissage et dans la réalisation de diverses tâches. Dans le même ordre d'idées, une étude de Diamond (2013) présente également un modèle dans lequel on retrouve la mémoire de travail, la flexibilité cognitive et le contrôle inhibiteur. Ce modèle indique que ces trois fonctions exécutives seraient nécessaires à plusieurs processus de haut niveau tels que le raisonnement, la résolution de problèmes et la planification. À la lumière de ces éléments, il apparaît donc que le contrôle inhibiteur est mis de l'avant par plusieurs auteurs comme étant une fonction exécutive importante dans l'apprentissage scolaire.

Pour ce projet de recherche, le contrôle inhibiteur serait donc le mécanisme cognitif utilisé pour supprimer une réponse inappropriée dans certaines situations, par exemple lorsque l'utilisation d'une conception intuitive ne correspondrait pas au concept scientifique correspondant. Il permettrait ensuite de sélectionner le concept scientifique adéquat.

2.1.2 La définition du concept du contrôle inhibiteur

Avant de décrire les mécanismes cognitifs associés au contrôle inhibiteur, il est important de comprendre la structure du cerveau. Le cerveau de l'être humain est composé de diverses cellules appelées *neurone*. Chaque neurone « est constitué de dendrites (qui captent les signaux provenant de neurones environnants) et d'un axone (qui transmet le signal aux autres neurones) » (Masson, 2020). Des neurones peuvent se connecter ensemble par la transmission d'un influx nerveux et former ainsi un réseau de neurones. Lorsqu'un influx nerveux arrive au bout d'un axone, des neurotransmetteurs sont alors libérés dans la synapse (espace entre deux neurones). De plus, le passage de cet influx nerveux entre deux neurones dépend des types de neurotransmetteurs situés dans la synapse. Les neurotransmetteurs peuvent être de type excitateur, et donc, contribuer à ce que l'influx nerveux circule dans les neurones. Ils peuvent également être inhibiteurs et ainsi contribuer à bloquer les effets excitateurs des autres neurotransmetteurs. C'est la proportion entre ces deux types de neurotransmetteurs qui permettra ou non à l'influx nerveux de se propager dans les neurones. Par exemple, si la quantité de neurones excitateurs est suffisante par rapport à la quantité de neurones inhibiteurs, l'influx nerveux se propagera dans les neurones. De cette façon, un influx nerveux peut se propager dans plusieurs neurones formant ainsi des réseaux de neurones. Des réseaux de neurones peuvent également être renforcés. En effet, plus un réseau de neurones est utilisé, plus ce réseau sera solidement établi et plus les connexions neuronales seront mobilisées efficacement (Masson, 2020).

Dans la section précédente, le contrôle inhibiteur a été défini comme un mécanisme cognitif permettant « la suppression des réponses inappropriées » (Thibault, Tapin et Tissier, 2017, p. 257). Ainsi, au niveau cérébral, cette fonction exécutive consiste à désactiver un réseau de neurones par un autre réseau de neurones. Compte tenu de ce qui précède, la quantité de neurotransmetteurs inhibiteurs doit être suffisante par rapport à la quantité de neurotransmetteurs excitateurs afin de bloquer la transmission de l'influx nerveux.

Pour mobiliser le contrôle inhibiteur, des régions cérébrales ciblées sont activées à différentes étapes. Dans un premier temps, la région du cortex cingulaire antérieur permet de détecter un conflit dans le traitement des informations présentées dans la tâche réalisée (Masson, 2014). De plus, cette région peut effectuer un calcul mental du coût cognitif de l'utilisation de certains concepts ou stratégies par rapport aux bénéfices apportés par celles-ci, c'est-à-dire de vérifier si elles « permettent d'obtenir des résultats satisfaisants tout en nécessitant peu de ressources cognitives » (Thibault, Tapin et Tissier, 2017, p. 258).

Lorsqu'un conflit est détecté ou que le calcul coût/bénéfice est effectué, cette région s'occupe d'envoyer un signal à deux autres régions, le cortex préfrontal dorsolatéral et le cortex préfrontal ventrolatéral. Le cortex préfrontal dorsolatéral analyse les informations contenues dans la mémoire de travail et décide quelles informations doivent être inhibées afin d'accomplir la tâche demandée, tandis que le cortex préfrontal ventrolatéral permet d'inhiber les réseaux de neurones associés aux informations non nécessaires. Ces dernières peuvent être associées à un automatisme, à une heuristique ou à une stratégie inefficace.

Hebb est l'un des premiers chercheurs à s'être intéressé à la modification des réseaux de neurones, et donc, à la modification des connexions neuronales. Ses recherches ont mené au principe aujourd'hui bien documenté selon lequel les neurones qui s'activent ensemble se connectent ensemble (Hebb, 1949). Lorsqu'un réseau de neurones est fréquemment activé, les neurones qui s'activent ensemble vont éventuellement se connecter ensemble plus facilement. Ces connexions neuronales vont donc se solidifier au fur et à mesure que le réseau de neurones est activé. Ces connexions neuronales peuvent donc devenir des automatismes qui pourraient devoir être inhibés dans certains contextes. Dans le cadre de cette étude, la première variable didactique est la familiarité des conceptions intuitives. Selon le principe de Hebb, plus les réseaux de neurones associés à une conception intuitive sont activés au quotidien, plus ces réseaux se solidifieraient avec le temps puisque ses réseaux s'activeraient à plusieurs reprises ensemble. Ce principe pourrait donc notamment contribuer à expliquer, au niveau cérébral, la persistance de certaines de ces conceptions intuitives très familières. Le contrôle inhibiteur serait donc nécessaire pour bloquer ces réseaux neuronaux qui ont été préalablement renforcés au quotidien en s'activant fréquemment.

Kahneman propose pour sa part un modèle visant à expliquer le processus du raisonnement humain. Ce modèle comprend deux systèmes de pensée différents : un premier système plus intuitif et plus rapide, qui entrerait en compétition avec un deuxième système plus analytique et plus lent (Kahneman et Clarinard, 2012). Ce modèle a ensuite été repris par Houdé (2014) qui y a ajouté un troisième système. Dans ce modèle à trois systèmes cognitifs, le premier système, le système heuristique, correspondrait à la pensée « automatique » et intuitive (Houdé, 2014). Ce chercheur définit une heuristique comme « une stratégie très rapide et très efficace » (Houdé, 2014). Il est donc plus économique d'un point de vue cognitif d'utiliser cette heuristique. Cependant, ces heuristiques ne sont pas toujours fiables et peuvent mener à l'utilisation de mauvais concepts ou à de mauvaises stratégies dans certains contextes. Le deuxième système, le système algorithmique, correspondrait plutôt à la pensée réfléchie « logico-mathématique ».

Ce second système est moins rapide que le système heuristique, mais il est plus fiable puisqu'il mène généralement à l'utilisation de concepts et de stratégies adéquates dans le contexte demandé. Un troisième système, le contrôle inhibiteur, aurait une fonction d'arbitrage (Houdé, 2014) entre le système 1 et le système 2. Il permettrait ainsi de bloquer les réseaux de neurones associés au système heuristique afin d'activer les réseaux associés au système algorithmique, lorsque la situation l'exige.

À titre d'exemple, des heuristiques ainsi que des stratégies de raisonnement peuvent entrer en compétition lors d'un apprentissage. Bien que ces heuristiques puissent être efficaces dans certaines situations, elles peuvent cependant mener à de mauvaises réponses lorsqu'elles sont utilisées dans certains contextes (Houdé et Borst, 2015). Le système d'inhibition serait donc en mesure de bloquer les heuristiques du système 1 afin de permettre au cerveau d'activer le système algorithmique et ainsi d'utiliser les stratégies adéquates pour l'apprentissage ciblé dans certaines situations.

Qui plus est, comme ce troisième système correspond à une fonction exécutive, son efficacité dépend de la maturation du cortex préfrontal (Houdé et Borst, 2015). En effet, Huttenlocher et ses collègues (1997) ont montré que de nombreuses connexions neuronales se créent et se suppriment tout au long de l'enfance et de l'adolescence. L'élagage de ces connexions neuronales dans le cortex préfrontal se terminerait vers 20 ans. Ainsi, les réseaux de neurones associés au contrôle inhibiteur atteindraient leur plein potentiel uniquement vers le début de la vingtaine.

Dans le contexte de la présente étude qui s'intéresse à l'apprentissage des sciences, le modèle des trois systèmes cognitifs de Houdé (2014) est celui utilisé afin d'expliquer les liens entre les concepts fondamentaux de ce projet de recherche. Il apparaît donc possible de dresser un parallèle entre les heuristiques (système 1) qui s'apparentent aux conceptions intuitives et les algorithmes (système 2) qui apparaissent plus semblables aux concepts acceptés scientifiquement. Les écrits scientifiques ont montré que des conceptions intuitives erronées et persistantes interfèrent en effet dans l'apprentissage des sciences. En plus des exemples donnés précédemment, un autre exemple documenté concerne la dissolution. Il semble naturel de croire que le sel « disparaît » dans l'eau lorsqu'il y est dissous puisqu'il est impossible de distinguer les molécules microscopiques de sel et d'eau avec l'œil humain. À l'échelle macroscopique, le sel semble bel et bien avoir disparu et cette explication correspond donc à une conception intuitive (système 1). Or, à l'échelle microscopique, les molécules de sel sont dispersées uniformément parmi les molécules d'eau, ce qui correspond à l'explication scientifique (système 2). Dans

certaines situations, le contrôle inhibiteur (système 3) pourrait donc être nécessaire pour inhiber le réseau de neurones associé à une conception intuitive (système 1) afin de fournir une explication utilisant le concept scientifique correspondant (système 2). Un autre exemple contextualisé dans ce modèle des trois systèmes concerne la flottaison de différents objets. Il apparaît plausible de croire intuitivement que les objets lourds coulent plus davantage que les objets légers. Pour cet exemple, la conception intuitive est de considérer uniquement la masse de l'objet pour déterminer si cet objet coule ou flotte. Le concept scientifique est de considérer la masse volumique de l'objet pour déterminer sa flottabilité ainsi que la poussée d'Archimède. Or, il a été démontré que le contrôle inhibiteur (système 3) permettrait de résister à cette conception intuitive (système 1) afin d'être en mesure de mobiliser le concept scientifique (système 2) (Houdé, 2014). Le contrôle inhibiteur peut donc agir de différentes façons, notamment en « permettant la suppression de réponses inappropriées » (Thibault, Tapin et Tissier, 2017, p. 257), en résistant à des interférences ou en bloquant de l'information non pertinente.

Différentes tâches classiques ont été élaborées afin d'obtenir une mesure indirecte de cette fonction exécutive. Une première tâche permettant cette mesure est celle de **Stroop** (1935). Dans cette tâche, on présente une liste de noms de couleurs aux participants et on leur demande de nommer la couleur de l'encre d'impression dans laquelle le mot est écrit. Certains mots correspondent à la couleur de l'encre d'impression (par exemple, le mot bleu est écrit en bleu). Cependant, certains noms de couleurs ne correspondent pas à la couleur de l'encre d'impression (par exemple, le mot bleu est écrit en rouge). Le participant doit alors inhiber sa tendance à lire le mot écrit (bleu) pour répondre et plutôt nommer la couleur de l'encre d'impression (rouge). Dans cette tâche classique, il a été observé que les temps de réponse sont plus longs pour un mot incongruent (où le mot écrit est différent de la couleur de l'encre d'impression) que pour un mot congruent (où le mot écrit correspond à la couleur de l'encre d'impression). Il est alors possible d'inférer la mobilisation du contrôle inhibiteur par des différences de temps de réponse entre les mots incongruents et les mots congruents.

Une deuxième tâche permettant d'inférer la mobilisation du contrôle inhibiteur est la tâche de **Go/No-Go** (Donders, 1969; Gomez, Radcliff et Perea, 2007) qui « demande, quant à elle, de répéter une action simple chaque fois qu'un stimulus est présenté, à l'exception d'un stimulus particulier » (Thibault, Tapin et Tissier, 2017, 2017, p. 258). Dans cette tâche, un participant doit donc « appuyer sur un bouton chaque fois que des lettres lui sont présentées, sauf lorsque la lettre « X » est présentée » (Thibault, Tapin et Tissier, 2017, p. 258). Lors de la tâche, le participant développe l'automatisme d'appuyer sur un bouton.

Lorsque la lettre « X » lui est présentée, il doit alors bloquer cet automatisme afin de résister à sa tendance de vouloir appuyer sur le bouton. Cette suppression demande au participant d'activer les régions cérébrales associées au contrôle inhibiteur et cela implique un coût cognitif pour lequel un certain temps est nécessaire.

Ces deux tâches demandent aux participants de mobiliser le contrôle inhibiteur. Puisqu'il a été montré que la mobilisation de cette fonction exécutive implique différentes régions cérébrales, et ce, à différents moments, des temps de réponse sont donc les mesures utilisées afin d'inférer sa mobilisation. Par ailleurs, les temps de réponse ont été utilisés dans le cadre d'autres tâches cognitives. Plusieurs recherches se sont donc intéressées au rôle du contrôle inhibiteur dans l'apprentissage de différents domaines en inférant sa mobilisation par le biais des temps de réponse ou encore en observant les régions cérébrales activées dans diverses tâches avec l'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle (IRMf).

2.1.3 Des exemples d'apprentissages scolaires nécessitant du contrôle inhibiteur

Les résultats de plusieurs recherches montrent que le contrôle inhibiteur est requis dans l'apprentissage de différents domaines, et surtout, lorsqu'un grand nombre d'erreurs sont persistantes et fréquentes. Dans le domaine des langues, Lanoë et ses collègues (2016) ont montré que le contrôle inhibiteur était nécessaire dans la conjugaison. Dans cette étude, des phrases dans lesquelles le déterminant « les » était parfois placé devant un nom et parfois placé devant un verbe étaient présentées aux participants. Les participants pouvant développer un automatisme de mettre un « s » après le mot « les » (ex. Je mange les bonbons) devaient inhiber cet automatisme, si nécessaire, lorsque le mot « les » était placé devant un verbe (ex. Je les manges). Les résultats de cette recherche ont montré que dans les situations incongruentes où le participant devait inhiber l'automatisme de mettre un « s » après le mot « les », les temps de réponse étaient plus longs. Ces résultats sont cohérents avec la définition de cette fonction exécutive qui indique que différentes régions cérébrales doivent être mobilisées à différentes étapes lors de la mobilisation du contrôle inhibiteur et que le besoin d'inhiber rend conséquemment la tâche plus longue.

Dans le domaine des mathématiques, Houdé et ses collègues (2011) ont mis en évidence le rôle du contrôle inhibiteur dans le cadre d'une tâche de conservation du nombre. La tâche à l'étude présentait deux rangées de jetons et il était demandé aux participants de dire si le nombre de jetons était identique dans les deux rangées. Sur certaines images, les jetons étaient plus espacés dans une rangée que dans

l'autre rangée. Les participants devaient alors inhiber l'automatisme « si la longueur de la rangée augmente, le nombre de jetons augmente également ». Les résultats de cette étude montrent qu'une région cérébrale associée au contrôle inhibiteur, le cortex préfrontal ventrolatéral, est davantage activée chez les participants dans les situations contre-intuitives où une rangée plus longue ne comprenait pas davantage de jetons. Ces résultats montrent bel et bien l'activation d'une région cérébrale associée au contrôle inhibiteur.

Dans le même domaine, le rôle du contrôle inhibiteur dans la résolution de problèmes écrits a été mis en évidence par Lubin et ses collaborateurs (2013). Dans cette étude, les participants devaient lire un problème mathématique et donner la réponse. Pour certains problèmes incongruents, l'opération à effectuer (soustraction) ne correspondait pas aux mots écrits dans la question (« de plus »). Pour l'énoncé (Mary a 25 billes. Elle a 5 billes de plus que John), les participants devaient ainsi effectuer une opération de soustraction ($25 - 5 = 20$) afin de calculer le nombre de billes de John. Pour ce faire, les participants devaient inhiber l'automatisme d'effectuer une addition si le mot « plus » était écrit dans le problème. Encore une fois, les résultats de cette étude montrent que les temps de réponse sont plus élevés pour les problèmes écrits incongruents que les problèmes écrits congruents, ce qui suggère la nécessité de mobiliser le contrôle inhibiteur pour réussir la tâche.

Finalement, la littérature scientifique met également en évidence que le contrôle inhibiteur est requis dans l'apprentissage des sciences. Une étude de Shtulman et Valcarcel (2012) a permis de souligner le besoin de contrôle inhibiteur dans l'apprentissage des sciences en utilisant encore une fois les temps de réponse. Un total de 200 phénomènes naturels ont été présentés aux participants. Les concepts faisaient partie de dix domaines différents tels que la matière, la physiologie, la génétique, l'évolution, les fractions, etc. Parmi les énoncés présentés aux participants, certains énoncés étaient congruents et faisaient donc référence à une conception intuitive menant un jugement scientifique approprié. Par exemple, l'énoncé « les roches sont composées de matière » est une conception intuitive qui est vraie scientifiquement. D'autres énoncés incongruents étaient composés d'une conception intuitive qui ne conduisait pas à un jugement approprié. Par exemple, il n'est pas vrai que du feu soit de la matière, alors que certains élèves peuvent avoir cette conception intuitive erronée. Les résultats de cette étude indiquent que les participants prenaient davantage de temps à vérifier les énoncés incongruents comparativement aux énoncés congruents.

Une autre étude d'Allaire-Duquette et ses collaborateurs (2019) a utilisé l'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle (IRMf) afin d'observer le niveau d'activation de régions cérébrales associées au contrôle inhibiteur, soit le cortex ventrolatéral et le cortex préfrontal dorsolatéral. Les participants devaient répondre à des questions associées à des énoncés congruents et à des énoncés incongruents. Pour les énoncés congruents, les conceptions intuitives menaient à un jugement approprié alors qu'elles menaient à un jugement inapproprié pour les énoncés incongruents. Les résultats de cette étude montrent que les deux régions cérébrales associées au contrôle inhibiteur, le cortex préfrontal ventrolatéral et le cortex préfrontal dorsolatéral, étaient davantage activées dans les situations incongruentes où le contrôle inhibiteur était mobilisé que dans les situations congruentes. En outre, un autre résultat permet de suggérer que la mobilisation du contrôle inhibiteur pourrait être plus ou moins importante selon le contexte : les élèves les plus compétents activaient davantage ces régions cérébrales. Cette différence porte donc à croire que le niveau de contrôle inhibiteur pourrait varier en fonction du niveau d'expertise.

De toute évidence, le contrôle inhibiteur apparaît donc nécessaire pour plusieurs apprentissages scolaires, notamment pour les apprentissages en sciences. Les résultats de nombreuses autres études convergent également avec ceux qui ont été présentés (Brault Foisy *et al.*, 2015; Masson *et al.*, 2014; Potvin *et al.*, 2020). Comme la littérature scientifique montre que le contrôle inhibiteur est présent dans l'apprentissage de différents domaines, dont les sciences, et que sa mobilisation pourrait être plus ou moins importante selon l'expertise, cela mène à se demander s'il pourrait avoir différents niveaux de contrôle inhibiteur requis selon les contenus scientifiques à apprendre.

2.2 Des indices que différents niveaux de contrôle inhibiteur sont parfois requis

Jusqu'à maintenant, un grand nombre d'études ont mis en évidence l'importance du contrôle inhibiteur, et ce, dans différents domaines. La littérature scientifique propose également que le niveau de contrôle inhibiteur pourrait varier selon différents facteurs (Allaire-Duquette *et al.*, 2019). En effet, sa mobilisation pourrait être plus ou moins importante selon différents facteurs. Un premier indice est que le niveau de contrôle inhibiteur semble parfois varier selon l'âge. La littérature scientifique montre d'abord que le contrôle inhibiteur est mobilisé non seulement chez les enfants et chez les adolescents, mais également parfois chez les adultes. Le besoin de mobiliser le contrôle inhibiteur dans certaines situations pourrait donc être présent tout au long de la vie. Par ailleurs, les résultats d'autres études indiquent que ce besoin de contrôle inhibiteur diminue parfois avec l'âge. L'étude de Lanoë et ses collègues (2016) présentée plus haut a été réalisée auprès de différents groupes d'âge. Les enfants, les adolescents ainsi que les adultes

montraient des temps de réponse plus élevés lors de situations incongruentes dans lesquelles ils devaient inhiber des automatismes (Je les manges) que dans les situations congruentes où aucune inhibition n'était demandée (Je mange les bonbons). Toutefois, en plus du besoin de contrôle inhibiteur, les résultats montrent que les temps de réponse diminuaient avec l'âge. Ainsi, ce sont les enfants qui prenaient davantage de temps pour répondre à une question nécessitant de l'inhibition, puis les adolescents et finalement les adultes. Comme les temps de réponse diminuaient avec l'âge, ceci porte donc à croire que les enfants auraient peut-être besoin d'un plus grand niveau de contrôle inhibiteur et, par conséquent, que le niveau de contrôle inhibiteur requis pour réaliser correctement une tâche pourrait varier, dans ce cas-ci en fonction de l'âge.

L'étude de Lubin et ses collaborateurs (2013) également discutée plus haut a aussi été menée auprès d'enfants, d'adolescents et d'adultes. Dans la même lignée que les résultats précédents, les enfants, les adolescents ainsi que les adultes prenaient davantage de temps pour répondre lors de situations nécessitant du contrôle inhibiteur. Qui plus est, de façon convergente, les temps de réponse diminuaient également avec l'âge. Parallèlement, l'étude de Viarouge et ses collègues (2019) a aussi permis de mettre encore en évidence une différence quant au niveau du contrôle inhibiteur chez des enfants, comparativement à des adultes. Dans cette étude, les participants réalisaient une tâche sous un paradigme d'amorçage négatif dans laquelle des paires de regroupements de points étaient présentées. Les regroupements de points pouvaient différer selon le nombre de points et leur taille. Dans un essai congruent, le regroupement ayant le plus grand nombre de points était aussi celui dont la taille des points était la plus grande. Dans un essai incongruent, le regroupement ayant le plus grand nombre de points était celui où la taille des points était la plus petite. Les participants devaient donc inhiber l'automatisme selon lequel plus les points sont de grandes tailles, plus le nombre de points est élevé. Les résultats obtenus indiquent que l'effet d'amorçage négatif était plus important chez les enfants que chez les adultes. Les chercheurs de l'étude suggèrent ainsi que le contrôle inhibiteur serait davantage mobilisé chez les enfants que chez les adultes, pour cette tâche.

Les résultats de l'étude de Brault Foisy et ses collègues (2021) portant sur la flottabilité appuient également cette idée. Les résultats indiquent en effet que l'écart entre les temps de réponse pour les éléments incongruents et les éléments congruents diminuaient avec l'âge, ce qui suggère que le niveau d'exposition aux connaissances scientifiques avec l'âge aurait possiblement un impact sur le niveau de contrôle inhibiteur requis. D'autres études récentes (Roell *et al.*, 2019; Brault Foisy *et al.*, 2021) suggèrent

également une variation du niveau de contrôle inhibiteur pour différents groupes d'âge. En somme, il semble se dégager de la littérature scientifique que la quantité de contrôle inhibiteur requis pour accomplir différentes tâches pourrait parfois varier en fonction de l'âge. Il s'agit donc d'un premier indice portant à croire que différents niveaux de contrôle inhibiteur pourraient être nécessaires, notamment en fonction de l'âge.

Un indice supplémentaire découle de la mobilisation du contrôle inhibiteur par les experts. En effet, la littérature scientifique met en évidence des différences au niveau de l'intensité de sa mobilisation selon le degré d'expertise ainsi qu'en fonction du taux de réussite à une tâche. Une première étude de Potvin et Cyr (2017) portant aussi sur la flottabilité a été réalisée auprès d'enfants, d'adolescents et d'enseignants de sciences détenant donc différents niveaux d'expertise en sciences. Comme cette étude s'appuie sur la prémisse que certaines conceptions intuitives sont persistantes et qu'elles coexisteraient avec les concepts scientifiques, les chercheurs ont émis l'hypothèse que la mobilisation du contrôle inhibiteur serait présente chez tous les participants, et ce, peu importe leur degré d'expertise. Comme attendu, leurs résultats montrent de façon générale que les temps de réponse portant sur des questions associées à des conceptions intuitives sont encore une fois plus élevés, et ce, même chez les participants les plus experts (enseignants de sciences). Par conséquent, le contrôle inhibiteur serait non seulement présent à tout âge, mais également chez tous les individus, qu'ils soient des experts ou non. Sans surprise, les résultats de cette étude montrent également que le taux de réussite à la tâche augmente avec le degré d'expertise. Par ailleurs, les résultats indiquent qu'il y aurait des différences quant à la nature des conceptions intuitives entrant en jeu, selon le niveau d'expertise des participants. Alors que les jeunes enfants et les adolescents semblaient adhérer à la conception intuitive selon laquelle le volume d'un objet détermine sa flottabilité (ils prenaient plus de temps pour répondre correctement), le raisonnement des enseignants adultes ne semblait plus affecté par cette conception intuitive liée au volume. Ces résultats mettent donc en lumière que la mobilisation du contrôle inhibiteur permettant de résister à certaines conceptions intuitives pourrait varier en fonction du niveau d'expertise.

Une deuxième étude d'Allaire-Duquette et ses collaborateurs (2019) a également permis de mettre en évidence des différences, cette fois en fonction du niveau de compétence scientifique des participants. Dans le cadre d'une tâche cognitive en science, les chercheurs ont observé que les participants les plus compétents en science présentaient une plus grande intensité au niveau de l'activation de régions cérébrales associées au contrôle inhibiteur, comparativement à des participants dont le niveau de

compétence était moins élevé, lorsqu'ils devaient évaluer des stimuli incongruents. De plus, les participants les plus compétents avaient un plus grand taux de réussite à la tâche que les participants les moins compétents. Ainsi, ces résultats suggèrent que le niveau de compétence en science serait associé à une plus grande capacité à mobiliser le contrôle inhibiteur. Les résultats de ces récentes études laissent donc entrevoir qu'il existerait une différence quant au niveau de mobilisation du contrôle inhibiteur en fonction du niveau d'expertise. En plus de l'âge, le niveau d'expertise pourrait donc influencer le niveau de contrôle inhibiteur requis dans différents contextes.

Un troisième indice permettant d'affirmer qu'il existerait différents niveaux de contrôle inhibiteur concerne la nature du contenu à apprendre. À cet égard, l'étude de Shtulman et Valcarcel (2012) discutée précédemment a été réalisée pour différents domaines scientifiques tels que l'astronomie, l'évolution, les fractions, la matière, la thermodynamique, la physiologie, la mécanique, etc. Dans cette étude, les temps de réponse des participants ont été comparés ainsi que l'exactitude des réponses fournies. Les résultats montrent que l'exactitude des réponses était plus élevée dans les domaines scientifiques où les apprentissages se font en bas âge (ex. les fractions et la physiologie) que dans les domaines scientifiques où les apprentissages se réalisent plus tard (ex. l'évolution et la mécanique). En plus de la différence dans l'exactitude des réponses, les résultats indiquent également que les temps de réponse étaient plus courts pour certains domaines (fractions et physiologie) que d'autres (la mécanique, l'astronomie et la thermodynamique). Cela représente donc un indice que la nature du contenu pourrait influencer l'intensité de la mobilisation du contrôle inhibiteur requis.

Dans un autre ordre d'idées, une étude de Aïte et ses collaborateurs (2019) s'est intéressée au rôle du contrôle inhibiteur sur le plan émotionnel, à différents âges. Dans cette étude, les participants ont d'abord effectué la tâche originale de **Stroop** (1935). Les résultats montrent une fois de plus que les temps de réponse étaient plus élevés pour des situations incongruentes, exigeant du contrôle inhibiteur, et que ces temps de réponse diminuaient avec l'âge. Dans cette même étude, une version modifiée de la tâche originale de **Stroop** (1935) dans laquelle les mots sont remplacés par des émotions et des visages exprimant une émotion (la peur, la tristesse, la frustration, etc.) a également été utilisée. Ainsi, les situations congruentes étaient des situations dans laquelle l'émotion écrite correspondait à l'émotion exprimée par le visage alors que les situations incongruentes étaient celles où l'émotion écrite ne correspondait pas à l'émotion exprimée par le visage. Les résultats indiquent que pour cette tâche adaptée, les temps de réponse ne diminuaient pas avec l'âge, comme dans la tâche originale. La courbe était plutôt

celle d'une équation quadratique suivant la forme d'une cloche inversée (\cap). Ainsi, les temps de réponse étaient beaucoup plus élevés chez les adolescents que chez les enfants et les adultes. Cette comparaison entre deux tâches, la tâche originale et celle portant sur les émotions met donc en évidence que le contenu de la tâche pourrait aussi exercer une influence sur le niveau de contrôle inhibiteur requis.

Ces exemples mettent donc de l'avant l'idée que les contenus d'une tâche auraient aussi une influence sur le niveau de contrôle inhibiteur mobilisé. Étant donné que cette idée de l'influence du contenu sur la mobilisation du contrôle inhibiteur semble avoir été moins approfondie par la recherche à ce jour, la section qui suit vise à s'intéresser aux variables, liées aux contenus d'apprentissage, susceptibles d'influencer le recours au contrôle inhibiteur.

2.3 Deux variables didactiques susceptibles d'influencer le niveau de contrôle inhibiteur pour des apprentissages en sciences

La présente étude vise à vérifier l'influence de deux variables didactiques (la familiarité des conceptions intuitives et la complexité des concepts scientifiques) sur la mobilisation du contrôle inhibiteur. Selon Astolfi et ses collègues (2008), la didactique se définit par :

a) Une réflexion sur les contenus d'enseignement. Elle s'intéresse à leur nature cognitive (savoir ou savoir-faire...); à leur statut épistémologique (savoir savant ou savoir social...); à la méthodologie de leur construction (transposition ou élaboration de savoirs); à leur organisation en curricula; à leur histoire institutionnelle... La dominante de cette tendance est épistémologique.

b) Des recherches sur les conditions d'appropriation des savoirs. Elle s'interroge alors moins sur les concepts et les notions en eux-mêmes, que sur leur construction dans l'apprentissage, les prérequis qu'ils supposent, les représentations ordinaires qu'en ont les apprenants, les différentes sortes d'obstacles à l'apprentissage qu'ils peuvent susciter... La dominante est psychologique (p. 70).

Cette définition montre que la didactique est donc différente selon les domaines d'étude (français, science, histoire, etc.) et qu'elle dépend directement du contenu enseigné. Ainsi, les deux variables de la présente étude sont donc considérées comme étant didactiques puisqu'elles portent sur des caractéristiques liées au contenu enseigné.

2.3.1 La variable didactique *familiarité*

Le terme familiarité est défini comme une « connaissance intime » dans le Multidictionnaire de la langue française (de Villers, 2009). Lorsque ce terme est employé comme adjectif, il est défini comme quelque chose que l'on « connaît bien, accessible, simple et bien connu » (de Villers, 2009). Pour ce projet de recherche, cette première variable didactique réfère aux conceptions intuitives entretenues par les élèves et qui sont associées à différents concepts scientifiques. La littérature scientifique permet de faire émerger plusieurs indicateurs qui pourraient contribuer à la familiarité d'une conception intuitive. Ces indicateurs sont discutés plus en détail ci-bas.

Le premier indicateur pouvant influencer le niveau de familiarité est la *prévalence socioculturelle*. La prévalence fait référence à la présence d'une conception intuitive dans l'environnement social et culturel. Cet environnement comprend notamment les interactions sociales et les médias. Ainsi, une conception intuitive dont la prévalence socioculturelle serait élevée se retrouverait fréquemment dans les médias et/ou les interactions sociales. De plus, cet indicateur réfère également à l'idée que les conceptions peuvent être « construites lorsque les individus s'engagent socialement dans des discussions et des activités sur des problèmes ou des tâches partagés » (Driver *et al.*, 1994). Plusieurs recherches indiquent que les médias peuvent à cet égard contribuer à la présence de conceptions intuitives erronées. À titre d'exemple, selon Arroio (2010), les films ainsi que les médias sont des sources d'informations qui influencent directement les perceptions des élèves. Bennett et ses collaborateurs (2006) confirment également que le cinéma et la télévision sont deux acteurs culturels contribuant à la présence de conceptions intuitives en sciences. En effet, il est parfois difficile de discerner la fiction des concepts scientifiquement acceptés. De plus, la Fondation Nationale pour la Science (2000) appuie cette idée que les médias contribuent négativement à la capacité d'avoir une réflexion critique par rapport à des phénomènes scientifiques. Selon celle-ci, les médias fictifs auraient corrodé l'esprit critique du public et auraient entravé la culture scientifique. Un récent exemple concerne la transmission de la COVID-19. Des médias ont en effet propagé des informations indiquant que la transmission du virus pourrait être compromise par la température, par l'humidité et par la lumière ultraviolette. Carlson et ses collègues (2020) indiquent que ces explications demandent des nuances, au niveau microbiologique, que certains médias ne sont pas toujours capables de faire. Ainsi, la compréhension de ce virus est donc directement affectée par les informations circulant dans les médias culturels. [Ces fausses informations pourraient donc affecter la compréhension des virus, et ainsi, engendrer des conceptions intuitives associées aux virus dans le futur.](#) En somme, la prévalence socioculturelle d'une conception intuitive pourrait contribuer à son

niveau de familiarité. En effet, plus la présence de cette conception intuitive est importante dans les médias et dans les interactions socioculturelles, plus son niveau de familiarité est susceptible d'être élevé. À l'inverse, moins une conception intuitive serait présente, moins celle-ci aurait de chance d'être familière.

Un deuxième indicateur pouvant influencer la familiarité est la *quotidienneté* d'une conception intuitive. Au quotidien, les élèves observent souvent des phénomènes qui se produisent spontanément et fréquemment dans la vie de tous les jours, et ce, sans aucune préparation. Ces nombreuses observations se font par leur sens (le toucher, la vue, le goût, l'odorat et l'ouïe) et elles leur permettent notamment d'élaborer des explications aux phénomènes auxquels ils sont confrontés. Ces explications fonctionnent comme des théories, c'est-à-dire qu'elles leur permettent de prédire le futur, d'expliquer le passé ou encore d'agir sur ce qui se passe dans le moment présent (Shtulman, 2022). À titre d'exemple, le comportement de la Terre est un concept auquel les élèves sont exposés quotidiennement. Ces derniers tentent ainsi assez naturellement d'expliquer son comportement comme celui d'un objet physique (Vosniadou et Skopeliti, 2014). Les caractéristiques attribuées à la Terre sont donc la solidité, la stabilité ainsi que l'absence d'un mouvement sans la présence d'une force extérieure. De plus, ils pensent souvent que les mouvements ne peuvent être que de haut en bas en raison de la gravité. Éventuellement, les élèves devront comprendre que la Terre est un objet astronomique et arriver à la décrire selon un système héliocentrique. Les conceptions intuitives qui sont familières peuvent ainsi être en lien avec des phénomènes que les apprenants observent régulièrement au quotidien comme le changement des saisons, le système solaire, les phases de la lune, etc. (Hermann et Lewis, 2003). En somme, la quotidienneté d'une conception intuitive serait également proportionnelle à son niveau de familiarité. Plus cette conception est utilisée dans l'explication d'évènements quotidiens, plus son niveau de familiarité est susceptible d'être élevé. À l'inverse, moins elle permet de fournir des explications à des phénomènes quotidiens, moins elle serait familière.

Un troisième indicateur influençant la familiarité est la *familiarité sémantique*. Le Multidictionnaire de la langue française (de Villers, 2009) définit la sémantique comme le sens des mots. Ainsi, la familiarité sémantique réfère au sens d'un mot fréquemment utilisé au quotidien pour décrire des phénomènes observables. Cependant, le sens d'un mot utilisé dans la vie de tous les jours peut ne pas correspondre au concept scientifique. Un exemple souvent cité dans la littérature scientifique est celui du terme chaleur qui peut être utilisé comme un nom, comme un adjectif ou comme un verbe au quotidien. Comme ce mot possède plusieurs sens, il peut apporter de la confusion dans sa compréhension au niveau scientifique

(Erickson, 1979). Lorsque la température augmente, les gens utilisent le terme chaleur à tort en disant qu'il fait plus chaud. Cependant, la température correspond au degré d'agitation des particules, alors que la chaleur correspond à la quantité d'énergie thermique transférée d'un milieu à un autre. Dans le même ordre d'idées, Kesidou et Duit (1993) affirment que les élèves du secondaire ont de grande difficulté à distinguer le concept d'énergie, le modèle particulaire ainsi que la distinction entre la chaleur et la température. En somme, la familiarité sémantique d'une conception intuitive pourrait influencer son niveau de familiarité. Plus la conception intuitive est associée à une grande familiarité sur le plan sémantique, plus la familiarité de la conception intuitive elle-même est susceptible d'être grande.

Un quatrième indicateur concerne l'*intuition*, définie comme « une connaissance directe et immédiate qui ne s'appuie pas sur la raison » (de Villers, 2009). Ainsi, une conception intuitive fortement reliée à l'intuition permet de décrire un phénomène à l'aide d'une structure causale simple ou en utilisant le sens commun. À titre d'exemple, les résultats de l'étude de Goldberg et Thompson-Schill (2009) montrent qu'il est plus difficile de dire que les végétaux sont des êtres vivants que les animaux. En effet, certaines personnes entretiennent la conception intuitive que tous les êtres vivants bougent, alors que cette caractéristique ne fait pas partie des sept caractéristiques des êtres vivants (MELS, 2001). Dans le même ordre d'idées, l'étude de Babai et ses collaborateurs (2010) a également été réalisée sur la classification d'objets vivants et d'objets non vivants. Les résultats de cette étude montrent qu'il est plus difficile de classer les plantes que les animaux comme étant des objets vivants. De façon convergente, une étude de Babai et Amsterdamer (2008) s'est intéressée à des conceptions intuitives relatives aux solides et aux liquides. Les participants devaient indiquer si les substances présentées étaient solides ou liquides. Comme certaines substances ne correspondaient pas aux propriétés données par l'intuition (rigidité et s'écouler), les participants avaient donc de la difficulté à classer certaines substances. Un autre exemple dans lequel l'intuition peut jouer sur les conceptions intuitives est dans le domaine de la chimie. L'étude de Thümay (2016) indique que les élèves, intuitivement, utilisent des propriétés macroscopiques afin d'expliquer les propriétés microscopiques. Par exemple, ils vont décrire les molécules et les atomes en utilisant des termes comme la dureté, la couleur, l'état physique et la température. En somme, le niveau d'intuition est donc un élément pouvant contribuer à la familiarité. Plus l'intuition associée à une conception est élevée, plus cela est susceptible d'influencer son niveau de familiarité.

Finalement, un autre indicateur pouvant influencer la familiarité est l'*utilité*. Une conception intuitive peut en effet permettre de produire une réponse permettant de satisfaire un besoin rencontré au quotidien ou

de conduire à une conclusion plus facilement que la conception scientifique. À titre d'exemple, le changement de saisons est un phénomène que les êtres humains vivent chaque année. Une conception intuitive permettant d'expliquer ce changement est la distance entre la Terre et le Soleil. Ainsi, la saison la plus chaude, l'été, serait lorsque la Terre est la plus près du soleil, alors que la saison la plus froide, l'hiver, serait lorsque la Terre est la plus éloignée du Soleil. Cette conception intuitive ne correspond donc pas au concept scientifique qui indique que les saisons dépendent plutôt de la révolution de la Terre autour du Soleil ainsi que de l'axe d'inclinaison de la Terre (MELS, 2011). La conception intuitive apparaît toutefois suffisamment utile pour expliquer un phénomène vécu au quotidien. En plus de permettre de satisfaire ce besoin d'explication, une conception intuitive utile peut être utilisée régulièrement par les élèves. Il apparaît donc probable que l'utilité d'une conception intuitive puisse contribuer à sa familiarité. Ainsi, plus une conception intuitive est utile, plus elle serait familière.

En somme, ces cinq indicateurs mis en évidence dans la littérature scientifique semblent pouvoir contribuer au niveau de la familiarité des conceptions intuitives. Ces derniers seront repris dans la méthodologie lorsqu'il sera question d'opérationnaliser la variable familiarité.

2.3.2 La variable didactique *complexité*

Le terme complexité fait référence au mot « complexe » dans le Multidictionnaire de la langue française (de Villers, 2009). On lui donne aussi la définition d'un concept « qui contient plusieurs éléments, plusieurs idées et qui n'est pas simple à comprendre » (de Villers, 2009). Ainsi, une conception scientifique peut être difficile à maîtriser parce que certaines caractéristiques la rendent spécialement complexe.

Un premier indicateur du degré de complexité d'un concept scientifique est le *niveau d'abstraction*. La littérature scientifique aborde fréquemment le caractère abstrait des concepts scientifiques comme étant un facteur contribuant aux difficultés dans l'apprentissage des sciences. En ce sens, le caractère abstrait d'un concept scientifique peut se traduire par la nécessité d'utiliser un langage symbolique pour représenter un phénomène, de faire appel à d'autres concepts scientifiques pour la compréhension ou de faire appel à des syllogismes. À titre d'exemple, la littérature scientifique utilise fréquemment des exemples dans le domaine de la chimie afin de montrer le caractère abstrait de certains concepts (Malenfant-Robichaud, 2018; Thümay, 2016). D'ailleurs, l'étude de Thümay (2016) met en évidence que les élèves ont beaucoup de difficulté à bien comprendre la nature des entités chimiques, leurs propriétés ainsi que leurs interactions. En effet, des représentations symboliques, des modèles et des équations sont

utilisés afin de représenter certains concepts scientifiques et la configuration des molécules joue un rôle crucial dans les propriétés. Ainsi, le fait de ne pas être capable d'observer directement les structures peut contribuer à la complexité d'un concept scientifique. En somme, le niveau d'abstraction d'un concept scientifique est donc susceptible de contribuer à son niveau de complexité. Plus un concept scientifique est abstrait, plus son niveau de complexité risque d'être élevé.

Un deuxième indicateur de la complexité d'un concept scientifique est la *charge cognitive*. Plusieurs éléments peuvent contribuer à l'augmentation de la charge cognitive comme les niveaux de conceptualisation ou la nécessité de tenir compte de plusieurs variables simultanément. À cet égard, Ohlsson (2009, p. 20) mentionne que « les connaissances antérieures sont la matière première de nouvelles connaissances ». La complexité d'un concept scientifique peut donc augmenter rapidement lorsque les élèves n'ont pas suffisamment consolidé les connaissances antérieures nécessaires. En plus de devoir maîtriser des connaissances antérieures, certains concepts scientifiques demandent d'être traités à différents niveaux de conceptualisation, ce qui peut contribuer à engendrer une charge cognitive plus grande. L'étude d'Harle et Towns (2011) soulève d'ailleurs l'importance des habiletés visuospatiales dans l'apprentissage de la biochimie. La représentation symbolique des molécules, la représentation macroscopique et la représentation microscopique d'un concept scientifique simultanément augmentent considérablement la charge cognitive de l'élève. Une autre étude de Levy Nahum et ses collaborateurs (2010) explique comment la charge cognitive peut être très élevée pour les concepts de liaisons chimiques et de structure moléculaire. En plus de devoir comprendre des concepts abstraits (molécules, ions, liaisons hydrogène, etc.), les apprenants doivent maîtriser des concepts de mathématiques et de physique tels que l'électronégativité, la répulsion des électrons, la polarité et la loi de Coulomb. En somme, la charge cognitive apparaît proportionnelle à la complexité d'un concept scientifique. Plus la charge cognitive est élevée, plus le concept est complexe.

Un troisième indicateur pouvant augmenter la complexité d'un concept scientifique est la *complexité sémantique* de ce dernier, c'est-à-dire le vocabulaire employé pour le décrire ou pour le définir. Cet indicateur peut se traduire par des mots qui ne sont pas fréquemment utilisés dans la langue usuelle ou par une terminologie riche et complexe. Par exemple, le domaine de la chimie possède un vocabulaire qui lui est propre afin de décrire la matière. Les mots atome, molécule, électron, neutron et proton ne sont pas utilisés dans le langage courant. En plus d'avoir une terminologie complexe, un même mot peut avoir des définitions différentes selon le contexte dans lequel il est utilisé. À cet égard, Jasien (2011) s'est

intéressé à l'utilisation du mot fort dans le domaine de la chimie. À titre d'exemple, une liaison chimique forte signifie qu'une grande quantité d'énergie est requise afin de briser cette liaison, alors qu'un acide fort signifie qu'il se dissocie facilement dans l'eau. En somme, la complexité d'un concept scientifique apparaît associée à la complexité sémantique. Plus un concept scientifique demande l'utilisation d'un vocabulaire complexe, plus son niveau de complexité augmente.

Un dernier indicateur pouvant augmenter la complexité d'un concept scientifique est la *complexité contextuelle*. Cet indicateur concerne les contextes des tâches dans lesquels les concepts scientifiques sont mobilisés. Par exemple, certains concepts sont possiblement mobilisés plus souvent dans le cadre de tâches nécessitant un plus grand nombre d'étapes. L'étude de Gulucar et Funeweever (2010) indique que les problèmes à plusieurs étapes sont présents dans l'apprentissage des sciences. Par exemple, les élèves doivent dessiner des diagrammes de corps libre, ajouter les vecteurs des forces appliquées ainsi qu'utiliser les équations de la deuxième loi de Newton et de la force résultante afin de calculer une vitesse finale dans un seul problème de dynamique. Dans le domaine de la chimie, les élèves doivent équilibrer une équation chimique, calculer le nombre de moles pour un réactif ou un produit et finalement utiliser les rapports stœchiométriques afin de calculer une quantité d'un autre réactif ou d'un autre produit dans un seul problème. Qui plus est, la présence d'un concept couramment abordé avec d'autres concepts dans un même problème peut également contribuer à la complexité contextuelle. À titre d'exemple, la température et la chaleur sont deux concepts scientifiques souvent confondus (Kesidou et Duit, 1993). Ainsi, dans un problème où l'élève doit déterminer la chaleur molaire d'une réaction, les deux concepts scientifiques devront être utilisés. En effet, la variation de température sera utilisée afin de calculer la chaleur molaire. Il apparaît donc que la complexité du contexte au sein duquel est souvent mobilisé le concept scientifique est susceptible d'influencer le niveau de complexité de ce dernier. Plus la complexité contextuelle est grande, plus il est probable que le niveau de complexité du concept scientifique soit élevé.

Pour la présente étude, ces quatre indicateurs permettront donc d'opérationnaliser la variable de la complexité d'un concept scientifique.

Tout compte fait, il est possible de remarquer que certains indicateurs touchent à des aspects similaires pour les deux variables didactiques. Tout d'abord, la sémantique influence les deux variables didactiques. Ainsi, le vocabulaire utilisé dans le domaine des sciences influence l'apprentissage des élèves. Les termes employés peuvent conduire les élèves à entretenir régulièrement certaines conceptions intuitives de

même que de pouvoir rendre davantage complexe l'apprentissage de certains concepts scientifiques. Puis, le contexte semble également influencer la familiarité des conceptions intuitives ainsi que la complexité des concepts scientifiques correspondants. En effet, une conception intuitive qui permettrait d'expliquer différents phénomènes scientifiques vécus au quotidien pourrait par exemple influencer l'apprentissage du concept scientifique correspondant. De même, un contexte complexe aurait alors l'effet de rendre plus difficile l'apprentissage du concept scientifique.

2.4 Les hypothèses de recherche

Considérant les difficultés fréquentes des élèves dans l'apprentissage des sciences au secondaire (TIMSS, 2019), de nombreuses études ont tenté de mieux comprendre les sources probables de ces difficultés. Parmi celles-ci, les conceptions intuitives et la complexité des concepts scientifiques seraient deux sources de difficulté qui concernent directement les contenus d'apprentissage (Brault Foisy *et al.*, 2021). En outre, il semblerait que le contrôle inhibiteur représenterait un mécanisme permettant de résister aux conceptions intuitives fréquentes qui sont parfois incompatibles avec les concepts scientifiques dans certaines situations (Allaire-Duquette *et al.*, 2019). Le cadre théorique a d'ailleurs permis d'expliquer cette fonction exécutive en dressant un parallèle avec le modèle des trois systèmes cognitifs de Houdé (2014). Dans ce modèle, le premier système (heuristique) serait associé aux conceptions intuitives présentes chez les élèves et le deuxième système (algorithmique) serait associé aux concepts scientifiques correspondants pour ce projet de recherche. Le contrôle inhibiteur serait alors le troisième système permettant de délaissier des conceptions intuitives dans certaines situations afin de sélectionner le bon concept scientifique. En outre, la littérature scientifique montre que le niveau de contrôle inhibiteur (mesuré notamment par les différences d'activation cérébrale ou de temps de réponse) peut parfois varier en termes d'intensité. Plusieurs études montrent notamment que le niveau de contrôle inhibiteur peut varier selon l'âge. En effet, les résultats de certaines études montrent que les enfants mobilisent parfois davantage le contrôle inhibiteur que les adolescents et les adultes. (Brault Foisy *et al.*, 2015; Lanoë *et al.*, 2016; Lubin *et al.*, 2019). De plus, le niveau de contrôle inhibiteur semble également varier selon le degré d'expertise. En effet, des élèves plus compétents semblent parfois mobiliser davantage cette fonction exécutive qui est également présente chez les experts. (Allaire-Duquette *et al.*, 2021; Goldberg *et al.*, 2009; Keleman *et al.*, 2012; Masson *et al.*, 2014; Potvin *et al.*, 2020). Finalement, l'intensité du contrôle inhibiteur semble pouvoir varier aussi selon le contenu d'apprentissage (Aïte *et al.*, 2019; Brault Foisy *et al.*, 2021; Shtulman et Valcarcel, 2012). Ainsi, il semble pertinent de chercher à mieux comprendre les facteurs pouvant influencer le niveau de contrôle inhibiteur nécessaire. En particulier, il apparaît pertinent de

vouloir préciser les variables propres au contenu (les variables didactiques) pouvant influencer le recours au contrôle inhibiteur. Les variables qui seront explorées pour la première fois dans le cadre de ce projet de recherche sont la *familiarité* d'une conception intuitive et la *complexité* d'un concept scientifique. La familiarité d'une conception intuitive pourrait alors varier selon sa prévalence socioculturelle, son niveau de quotidienneté, sa familiarité sémantique, son niveau d'intuition et selon son utilité. Quant à elle, la complexité d'un concept scientifique pourrait varier selon son niveau d'abstraction, sa charge cognitive, sa complexité sémantique et sa complexité contextuelle.

Ainsi, ce projet de recherche vise à répondre à la question suivante : *est-ce que la familiarité des conceptions intuitives et la complexité de leur concept scientifique correspondant influencent le niveau de contrôle inhibiteur requis pour répondre à des questions portant sur des concepts scientifiques associés à des conceptions intuitives fréquentes au secondaire ?*

L'hypothèse générale de ce projet de recherche est que le recours au contrôle inhibiteur serait modulé à la fois par le niveau de *familiarité* de la conception intuitive et par le niveau de *complexité* du concept scientifique correspondant. Selon cette hypothèse, plus une conception intuitive est familière, plus lui résister serait exigeant. Dans le même sens, plus le concept scientifique est complexe, plus l'effort nécessaire à son appréhension et à son éventuelle sélection serait également grand. De façon opérationnelle, l'effet de ces variables didactiques sera étudié dans le cadre de tâches cognitives impliquant différentes conceptions intuitives associées à des concepts scientifiques distincts. Un paradigme d'amorçage négatif permettra de mettre en lumière la mobilisation du contrôle inhibiteur ainsi que son amplitude (ce paradigme est présenté en détail au prochain chapitre). Une confirmation de l'hypothèse de recherche se traduirait par un effet d'amorçage négatif de plus grande amplitude (indice d'un plus grand contrôle inhibiteur) pour les conceptions intuitives présentant un haut niveau de familiarité de la conception intuitive et un niveau de complexité du concept scientifique correspondant. À l'inverse, un effet d'amorçage négatif de plus faible amplitude (indice d'une moins grande mobilisation du contrôle inhibiteur) serait observé pour les conceptions intuitives présentant un faible niveau de familiarité, auxquelles sont associés des concepts scientifiques présentant un niveau de complexité.

CHAPITRE 3

LA MÉTHODOLOGIE

Ce troisième chapitre présente et justifie les principaux choix méthodologiques qui ont été faits pour ce projet de recherche. Cette présente recherche a d'ailleurs été réalisée en quatre phases :

1. L'identification des quatre paires de conceptions utilisées dans les tâches cognitives;
2. La création des quatre tâches cognitives;
3. La collecte de données dans une école secondaire;
4. L'analyse des données.

Les sections de ce chapitre sont donc divisées selon ces quatre grandes phases du projet. Avant tout, les caractéristiques générales des participants sélectionnés ainsi que les modalités de recrutement et d'échantillonnage sont présentées. Puis, la section suivante présente ensuite la première phase du projet, soit les quatre conditions expérimentales qui ont permis d'opérationnaliser les deux variables didactiques. Les étapes ayant conduit aux choix des conceptions intuitives ainsi que de leur concept scientifique correspondant sont expliquées. Cette section se termine par la présentation de la méthode utilisée pour inférer la mobilisation du contrôle inhibiteur. La section suivante correspond à la deuxième phase du projet en expliquant les différentes étapes qui ont permis de réaliser les quatre tâches cognitives. La section suivante présente la troisième phase du projet en détaillant le déroulement de la collecte de données auprès des participants. La section subséquente présente la dernière phase du projet de recherche en expliquant les analyses effectuées avec les données collectées. Finalement, le chapitre se termine par les considérations éthiques d'usage.

3.1 Les participants

Cette section présente les critères relatifs aux participants, sélectionnés au début du projet de recherche, permettant par la suite de vérifier l'influence des deux variables didactiques sur la mobilisation du contrôle inhibiteur. Puis, les particularités des participants dont les données ont été utilisées lors de l'analyse sont présentées dans la section suivante.

3.1.1 Les caractéristiques générales des participants sélectionnés

Ce projet de recherche s'inscrit dans le cadre d'un projet de recherche de plus grande envergure mené par la chercheuse Lorie-Marlène Brault Foisy (UQAM). Le devis général du projet consiste à réaliser une analyse croisée des effets des deux variables didactiques, la familiarité des conceptions intuitives et la complexité du concept scientifique correspondant, sur la mobilisation du contrôle inhibiteur permettant de résister à l'activation des conceptions intuitives ne menant pas à une bonne réponse dans certaines situations. Le projet dans son ensemble s'intéresse à trois groupes d'âge différents : des élèves de niveau primaire, des élèves de niveau secondaire et des apprenants adultes. Ainsi, certains critères influençant l'élaboration des tâches cognitives ont dû être respectés. Ces critères sont présentés dans la section sur la réalisation des quatre tâches cognitives.

Cette présente recherche se porte spécifiquement sur le groupe d'âge des élèves de niveau secondaire. Ainsi, le premier critère a été de sélectionner des élèves en quatrième secondaire, âgés de 15 à 18 ans. Ces élèves devaient donc suivre le cours de Science et Technologie (ST), de Science et Technologie de l'Environnement (STE) ou d'Applications Technologiques et Scientifiques (ATS) dans une école secondaire publique du Québec. De plus, les tâches cognitives informatisées utilisent différentes images afin de représenter des items. Les données d'un élève daltonien ont donc dû être enlevées pour l'analyse puisque cette anomalie au niveau de la vision peut avoir une influence sur la rapidité avec laquelle le participant répond à une question. Comme une donnée collectée est le temps de réponse, il n'était alors pas possible de conserver les données de ce participant.

3.1.2 Les modalités de recrutement et d'échantillonnage

Le recrutement des participants a eu lieu dans le Centre de services scolaire des Mille-Îles (CSSMI) durant l'année scolaire 2022-2023. Une demande d'expérimentation a d'abord été envoyée afin de recevoir l'approbation nécessaire pour procéder au recrutement des participants. Une fois le dossier analysé et accepté, le comité du CSSMI a présenté le projet de recherche aux directions des écoles afin de trouver des enseignants qui souhaitaient participer à ce projet de recherche.

Au total, ce sont trois enseignants d'une même école qui ont accepté de participer à ce projet de recherche. Pour un total de sept classes, ce sont 187 participants qui auraient donc pu accomplir les quatre tâches cognitives. Afin de collecter les données, deux visites ont été nécessaires. Certains participants n'ont pas été en mesure d'accomplir les quatre tâches cognitives puisqu'ils n'ont pas été présents durant les deux

visites. Les données de ces participants n'ont donc pas été conservées pour l'analyse. De plus, plusieurs participants ont dû être exclus puisqu'ils ne répondaient pas bien aux questions. Ils étaient distraits; ils ont arrêté de répondre aux questions en plein milieu d'une tâche; ils faisaient une compétition avec la personne assise à côté d'eux, etc. Au terme de ces exclusions, les données de 119 participants ont été utilisées lors des premières analyses. Une étude antérieure a obtenu une puissance satisfaisante en utilisant un nombre similaire de participants (Brault Foisy *et al.*, 2021). La synthèse des caractéristiques descriptives est présentée dans le Tableau 3.1.

Tableau 3.1 La synthèse des caractéristiques descriptives des 119 participants qui ont complété les quatre tâches cognitives

Genre	Nombre de participants	Âge (années)
Homme	61	16,27 (0,18)
Femme	55	16,38 (0,84)
Autre	3	16,33 (0,17)

Note. Les écarts-types apparaissent entre parenthèses.

Par la suite, les données d'autres participants ont été également enlevées puisqu'elles ne répondaient pas à des critères supplémentaires. Cette étape supplémentaire est détaillée dans la section de l'analyse des données.

3.2 La première phase : l'identification des quatre conceptions intuitives

La première phase de ce projet de recherche a permis d'identifier les quatre paires de conceptions utilisées dans les quatre tâches cognitives. Chaque paire est composée d'une conception intuitive et du concept scientifique correspondant. L'utilisation de la conception intuitive dans certaines situations peut mener à une bonne réponse alors qu'elle peut également mener à une mauvaise réponse dans d'autres situations. Quant à lui, le concept scientifique correspondant est compris dans les cursus scolaires.

Afin de sélectionner les quatre paires de conceptions utilisées dans les tâches cognitives, certains critères ont dû être respectés. Dans un premier temps, les conceptions intuitives devaient être associées à un concept scientifique pour lequel des élèves du deuxième cycle du primaire auraient reçu un enseignement formel. En effet, comme ce projet s'inscrit dans un projet de recherche de plus grande envergure visant à comparer plusieurs groupes d'âge, les paires de conceptions devaient être les mêmes pour tous les

groupes d'âge, allant des enfants aux adultes. Dans un deuxième temps, les conceptions intuitives et leur concept scientifique correspondant devaient pouvoir être représentés à l'aide d'images étant donné qu'elles ont été étudiées dans le cadre de quatre tâches cognitives informatisées. Dans un troisième temps, les paires de conceptions devaient permettre de vérifier les hypothèses émises au départ. Comme l'objectif de ce projet de recherche est de vérifier les effets du niveau de familiarité des conceptions intuitives ainsi du niveau de complexité d'un concept scientifique, les conceptions intuitives devaient être différentes au niveau de la familiarité et les concepts scientifiques devaient également être différents au niveau de leur complexité. Ainsi, avant même la sélection des quatre paires de conceptions, quatre conditions expérimentales ont été déterminées.

3.2.1 Les conditions expérimentales

Les quatre conditions expérimentales sont directement liées aux hypothèses de cette recherche concernant l'influence de la familiarité des conceptions intuitives et de la complexité du concept scientifique correspondant sur la mobilisation du contrôle inhibiteur. Ainsi, les conceptions intuitives ont un faible ou un haut niveau de familiarité et les concepts scientifiques ont un faible ou un haut niveau de complexité. Ces quatre conditions expérimentales sont présentées dans le Tableau 3.2.

Tableau 3.2 Les quatre conditions expérimentales

Degré de complexité du concept scientifique	Degré de familiarité de la conception intuitive	
	Faible (↓)	Élevé (↑)
Faible (↓)	F↓C↓	F↑C↓
Élevé (↑)	F↓C↑	F↑C↑

3.2.2 La sélection des quatre conceptions intuitives par des experts

Parmi de nombreuses conceptions intuitives documentées dans la littérature scientifique, un total de huit conceptions intuitives ainsi que leur concept scientifique correspondant ont d'abord été sélectionnés au regard de trois critères principaux nommés dans les sections précédentes. Les huit paires de conceptions qui ont été évaluées par le groupe d'experts sont présentées dans le Tableau 3.3.

Tableau 3.3 Les huit paires de conceptions intuitives et leur concept scientifique correspondant

Paire	Thème	Conceptions intuitives	Concepts scientifiques
1	La flottabilité	Les objets lourds coulent davantage que les objets légers.	Les objets ayant une masse volumique plus élevée coulent plus que les objets ayant une masse volumique plus faible.
2	Les corps en chute libre	Les objets lourds tombent plus rapidement que les objets légers.	L'accélération gravitationnelle est la même pour tous les objets (en négligeant la résistance de l'air).
3	L'ébullition de l'eau	L'eau qui bout à gros bouillon est plus chaude que l'eau qui bout à petit bouillon.	L'eau bout toujours à 100 degrés Celsius (à pression normale).
4	Le magnétisme	Tous les métaux sont attirés par les aimants.	Seuls certains métaux sont attirés par les aimants.
5	Les états de la matière	Les solides sont rigides.	Certains solides ne sont pas rigides.
6	Les champignons	Les champignons sont des végétaux.	Les champignons forment un règne distinct des végétaux.
7	Le système Soleil-Terre-Lune	Le Soleil et la Lune sont à des distances similaires de la Terre.	Le Soleil est environ 400x plus loin de la Terre que de la Lune.
8	Les êtres vivants	Ce qui bouge est vivant.	Les êtres vivants sont des organismes composés d'une ou plusieurs cellules.

Afin de déterminer les quatre paires de conceptions répondant le mieux aux quatre conditions expérimentales, un groupe de vingt experts, formés de professeurs universitaires dans le domaine de la didactique des sciences, ont évalué les huit paires de conceptions (conception intuitive et concept scientifique correspondant) en utilisant des échelles de Likert. Avant de réaliser cette étape, les vingt experts ont rempli un formulaire de consentement (voir Annexe G). Puis, en utilisant des échelles de Likert, ces experts en didactique ont classé les huit paires en attribuant un niveau de familiarité pour chaque conception intuitive et un niveau de complexité pour chaque concept scientifique (Fortin et Gagnon, 2022),

en plus d’attribuer un score pour chaque indicateur lié à chacune de ces deux variables. Dans les échelles utilisées, une valeur de 1 signifiait que la conception intuitive n’était pas du tout familière alors qu’une valeur de 6 signifiait que la conception intuitive était extrêmement familière. De la même façon, une valeur de 1 signifiait que le concept scientifique n’était pas du tout complexe alors qu’une valeur de 6 signifiait que le concept scientifique était extrêmement complexe. Le Tableau 3.4 présente l’échelle utilisée pour l’indicateur quotidienneté de la variable familiarité. Les échelles utilisées pour les autres indicateurs possèdent la même structure.

Tableau 3.4 Les valeurs numériques et les définitions des échelles de Likert utilisées lors de l’évaluation de l’indicateur quotidienneté de la variable familiarité

Valeurs numériques	Définition
	Ne s’applique pas / Je ne sais pas
1	Pas du tout quotidienne
2	Très peu quotidienne
3	Peu quotidienne
4	Modérément quotidienne
5	Très quotidienne
6	Extrêmement quotidienne

Afin de s’assurer de la compréhension des indicateurs par les experts, une courte définition de chacun des indicateurs ainsi que des exemples précédait chacune des échelles dans le questionnaire utilisé. Pour la première variable didactique, la *familiarité*, cinq échelles de Likert ont donc été utilisées pour chaque indicateur. Le Tableau 3.5 présente les exemples donnés aux didacticiens afin de bien évaluer le niveau de familiarité de chaque conception intuitive.

Tableau 3.5 Les définitions et des exemples pour chaque indicateur permettant aux didacticiens d'évaluer le degré de familiarité d'une conception intuitive

Indicateurs	Définitions	Exemples
Quotidienneté	L'ensemble des critères relatifs à la possibilité de « vivre » la conception dans la vie de tous les jours, en termes de fréquence ou de facilité	<ul style="list-style-type: none"> - On peut expérimenter cette conception ou le phénomène associé à l'aide de nos sens. - Observer ce phénomène ne requiert aucune préparation particulière. - Le phénomène se produit régulièrement de lui-même (phases de la lune, les saisons, etc.). - Le phénomène est susceptible de se produire spontanément et fréquemment dans la vie de tous les jours (objets qui tombent, qui roulent, etc.). - Etc.
Prévalence socioculturelle	L'ensemble des critères relatifs à la possibilité d'être exposé à la conception à travers des interactions sociales, les médias, etc.	<ul style="list-style-type: none"> - Des mythes communs et répandus y sont associés. - Fait l'objet de discussion dans les médias populaires. - On retrouver cette conception dans un ou des films à gros budget. - Touche un sujet d'actualité ou qui fait régulièrement l'actualité. - Etc.
Familiarité sémantique	L'ensemble des critères relatifs au vocabulaire employé et à son utilisation usuelle dans la vie de tous les jours.	<ul style="list-style-type: none"> - Fait référence à des mots faisant partie du vocabulaire usuel des élèves et dont le sens diffère de la définition « scientifique ». - Utilise des mots qui par leur définition usuelle sont susceptibles d'orienter les élèves vers une mauvaise piste. - Le vocabulaire employé dans cette conception est associé à des expressions familières dont le sens figuré est susceptible d'induire les élèves en erreur. - Etc.

Indicateurs	Définition	Exemples
Intuitivité	L'ensemble des critères relatifs au caractère intuitif des conceptions.	<ul style="list-style-type: none"> - Il est possible de décrire le phénomène par une structure causale simple (ex : si je pousse, ça avance, et si j'arrête, ça arrête). - Il n'est pas nécessaire de recourir à une explication complexe pour expliquer le phénomène. - Le sens commun (« common sense ») suffit pour expliquer le phénomène. - L'explication commune du phénomène est le produit d'un raisonnement non problématique qui va de soi (« unproblematic & self-evident »). - Etc.
Utilité	L'ensemble des critères relatifs à l'utilité <u>perçue</u> des conceptions.	<ul style="list-style-type: none"> - Permet d'expliquer des phénomènes familiers (ex : « ferme la porte, le froid va entrer! » suppose que le froid existe). - Permet de parvenir à la bonne conclusion plus facilement que la conception scientifique (ex : « la théorie erronée de l'<i>impetus</i> permet de justifier le port de la ceinture de sécurité en voiture autant que les lois de Newton »). - Est régulièrement évoquée par les élèves pour justifier leurs idées ou leurs réponses. - Etc.

Pour la variable didactique *complexité*, quatre échelles de Likert ont été utilisées. Le Tableau 3.6 présente les exemples donnés aux didacticiens afin de bien évaluer le degré de complexité de chaque concept scientifique.

Tableau 3.6 Les définitions et des exemples pour chaque indicateur permettant aux didacticiens d'évaluer le degré de complexité d'un concept scientifique

Indicateurs	Définitions	Exemples
Niveau d'abstraction	L'ensemble des critères relatifs au caractère abstrait des concepts scientifiques.	<ul style="list-style-type: none"> - Nécessité de recourir à un langage symbolique pour se représenter le phénomène. - Recours à des syllogismes plutôt qu'à des exemples concrets pour expliquer le phénomène. - Nécessité de faire appel à d'autres concepts scientifiques pour comprendre ce concept particulier. Les exemples de ce concept sont difficiles à distinguer conceptuellement des contre-exemples, ou encore des exemples semblables (ex : élément, atome et molécule; deux substances peuvent avoir des apparences semblables malgré une nature complètement différente, etc.). - Etc.
Charge cognitive	L'ensemble des critères relatifs à la charge cognitive supplémentaire exigée par l'acquisition des concepts scientifiques.	<ul style="list-style-type: none"> - Fait appel à plusieurs niveaux de conceptualisation (invisible, microscopique, macroscopique, symbolique, etc.). - Manipuler ce concept nécessite de tenir compte de plusieurs variables simultanément. - Nécessite un grand nombre de manipulations épistémiques pour le rendre le concept intelligible. - Etc.
Complexité sémantique	L'ensemble des critères relatifs aux spécificités du vocabulaire scientifique employé pour décrire et/ou définir les concepts.	<ul style="list-style-type: none"> - Recours à une terminologie complexe et dense. - Utilise des mots précis et riches en signification. - Fait référence à des mots qui ne sont pas fréquemment utilisés dans la langue usuelle. - Nécessite l'acquisition d'un vocabulaire spécifique pour bien se représenter le phénomène. - Etc.

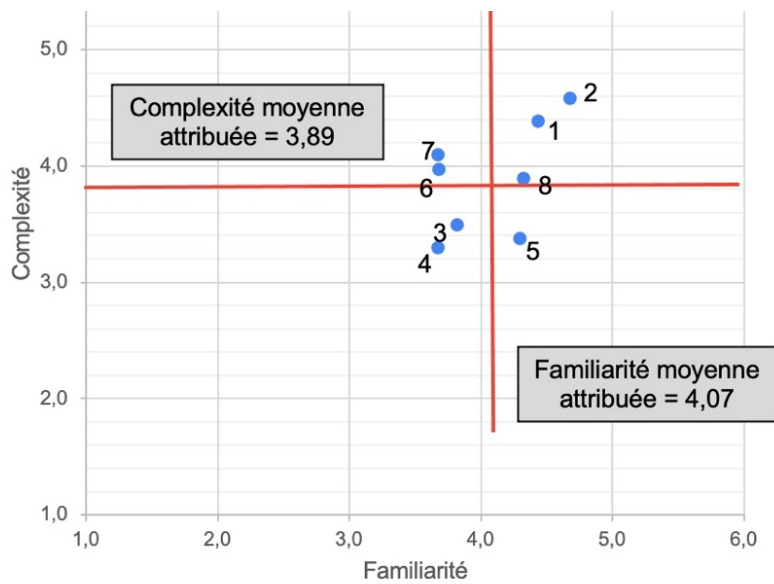
Indicateurs	Définition	Exemples
Complexité contextuelle	L'ensemble des critères relatifs aux contextes dans lesquels sont appliqués les concepts scientifiques.	<ul style="list-style-type: none"> - Les tâches ou les problèmes à résoudre impliquant le concept nécessitent un grand nombre d'étapes pour parvenir à la solution. - Mettre en application cette conception dans un contexte donné requiert un grand nombre de sauts logiques. - Le concept est souvent abordé conjointement à d'autres conceptions au sein d'un même problème ou d'une même tâche. - Etc.

De plus, les didacticiens ont également attribué un score global de *familiarité* à chacune des huit conceptions intuitives ainsi qu'un score global de *complexité* à chacun des huit concepts scientifiques.

L'évaluation des experts par le biais d'un questionnaire a permis de mettre en évidence les quatre paires de conceptions répondant le mieux aux quatre conditions expérimentales. Comme chacun des experts a procédé à l'évaluation des neuf indicateurs pour les huit paires de conceptions, l'ensemble des évaluations totalisait plus de 1800 données. Parmi ces dernières, plusieurs données étaient « Je ne sais pas / Ne s'applique pas » et elles n'ont donc pas été conservées puisqu'elles ne contribuent pas au niveau des variables didactiques. De plus, quatre données supplémentaires ont été enlevées. Ces données sont celles d'un didacticien ayant donné un score de 6 pour chaque indicateur de la complexité de la paire de conceptions cinq, ce qui était anormalement élevé par rapport aux autres experts, soit plus de 3,5 écarts-types de la moyenne. C'est donc un total de 1761 données qui ont été utilisées afin de déterminer les paires de conceptions correspondant le mieux aux quatre conditions expérimentales. Pour calculer les scores moyens, en premier lieu, une moyenne des valeurs numériques de chacun des indicateurs a été calculée, et ce, pour les deux variables didactiques. En deuxième lieu, un score moyen pour chaque variable didactique a été déterminé en calculant la moyenne de celles de chaque indicateur. Pour la variable didactique *familiarité*, le score moyen correspond donc à la moyenne des cinq moyennes calculées à la première étape. Pour la variable didactique *complexité*, le score moyen correspond à la moyenne des quatre moyennes calculées lors de la première étape. En transposant ces scores moyens

dans le graphique de la Figure 3.1 ci-dessous, les quatre paires de conceptions intuitives répondant le mieux à chacune des conditions expérimentales étaient observables. Afin de confirmer les observations, une ANOVA incluant les paires de conceptions 2, 4, 5 et 7 a été réalisée. Les résultats ont alors permis de confirmer que ces paires étaient significativement différentes $F(3, 76) = 11,350, p < 0,001$ au plan de la familiarité et/ou de la complexité $F(3, 75) = 11,354, p < 0,001$.

Figure 3.1 Les scores moyens des huit paires évalués par les experts en didactique des sciences



Cependant, la paire 2 a dû être remplacée par la paire 1. En effet, nous ne sommes pas parvenus, a posteriori, à concevoir une tâche cognitive qui respectait le paradigme d’amorçage négatif pour la paire 2. Ce paradigme sera expliqué plus en détail dans une section à venir. Au terme de cette première phase, les quatre paires de conceptions retenues pour ce projet de recherche sont présentées dans le Tableau 3.7.

Tableau 3.7 Les quatre paires formées d'une conception intuitive et de leur concept scientifique correspondant pour chacune des quatre conditions expérimentales

Degré de complexité du concept scientifique	Degré de familiarité de la conception intuitive	
	Faible (↓)	Élevé (↑)
Faible (↓)	Paire retenue 4 : F↓C↓ Tous les métaux sont attirés par les aimants.	Paire retenue 5 : F↑C↓ Les solides sont rigides.
	Seuls certains métaux sont attirés par les aimants.	Certains solides ne sont pas rigides.
Élevé (↑)	Paire retenue 7 : F↓C↑ Le Soleil et la Lune sont à des distances similaires de la Terre.	Paire retenue 1 : F↑C↑ Les objets lourds coulent davantage que les objets légers.
	Le Soleil est environ 400x plus loin de la Terre que de la Lune.	Les objets ayant une masse volumique plus élevée coulent plus que les objets ayant une masse volumique plus faible.

De plus, le test post hoc de Bonferroni confirme que les conditions diamétralement opposées (1 et 4), qui correspondent directement aux deux hypothèses de ce projet de recherche, sont significativement différentes. Ces résultats sont présentés dans le Tableau 3.8.

Tableau 3.8 La comparaison des scores de familiarité et de complexité des quatre paires sélectionnées

Degré de complexité	Degré de familiarité		
	Faible (↓)	↔	Élevé (↑)
Faible (↓)	Paire retenue 4 : F↓C↓	Différence de familiarité statistiquement significative ($\rho = ,017$) Différence de complexité non significative ($\rho = 1,000$)	Paire retenue 5 : F↑C↓
↕	Différence de complexité statistiquement significative ($\rho = 1,000$) Différence de familiarité non significative ($\rho = ,015$)	Différence de familiarité statistiquement significative ($\rho < ,001$) Différence de complexité non significative ($\rho = ,365$)	Différence de complexité statistiquement significative ($\rho < ,001$) Différence de familiarité non significative ($\rho = ,499$)
Élevé (↑)	Paire retenue 7 : F↓C↑	Différence de familiarité statistiquement significative ($\rho < ,001$) Différence de complexité non significative ($\rho = ,365$)	Paire retenue 1 : F↑C↑

Pour les prochaines sections, les quatre tâches cognitives référeront aux quatre conditions expérimentales dans le but de vérifier l'influence des deux variables didactiques sur la mobilisation du contrôle inhibiteur. Ainsi, une première tâche cognitive utilise une conception intuitive avec un faible niveau de familiarité et un concept scientifique avec un faible niveau de complexité (condition 1 : F↓C↓). La deuxième tâche cognitive utilise une conception intuitive avec un haut niveau de familiarité et un concept scientifique avec un faible niveau de complexité (condition 2 : F↑C↓). La troisième tâche cognitive utilise une conception intuitive avec un faible niveau de familiarité et un concept scientifique avec un haut niveau de complexité (condition 3 : F↓C↑). Finalement, la quatrième tâche cognitive utilise une conception intuitive avec un haut niveau de familiarité et un concept scientifique avec un haut niveau de complexité (condition 4 : F↑C↑). Les quatre conditions expérimentales sont donc :

1. F↓C↓
2. F↑C↓
3. F↓C↑
4. F↑C↑

Suite à la sélection des quatre paires de conceptions, la deuxième phase a pu être entamée. La création de tâches cognitives a été réalisée.

3.3 La deuxième phase : la création des quatre tâches cognitives

Afin de vérifier l'influence des deux variables didactiques sur la mobilisation du contrôle inhibiteur, quatre tâches cognitives ont été réalisées. Chaque tâche cognitive correspond à une des quatre conditions expérimentales. Avant de créer ces tâches, une méthode permettant d'inférer la mobilisation du contrôle inhibiteur a dû être choisie.

3.3.1 Le choix de la méthode pour inférer la mesure du contrôle inhibiteur

Jusqu'ici, la littérature scientifique a utilisé différentes méthodes pour identifier la mobilisation du contrôle inhibiteur. Certaines recherches ont utilisé l'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle (IRMf) qui permet de mesurer l'activité cérébrale lors de la réalisation d'une tâche cognitive (Masson *et al.*, 2017). Cette technique permet de mettre en évidence différents niveaux d'activation de certaines régions cérébrales associées au contrôle inhibiteur. Par exemple, les données de l'étude d'Allaire-Duquette et ses collègues (2019) ont montré que les élèves davantage compétents en science ont une plus grande activation du cortex préfrontal ventrolatéral bilatéral et du cortex préfrontal dorsolatéral bilatéral lorsqu'ils répondent à des questions portant sur des énoncés incongruents que sur des questions portant sur des énoncés congruents. Une autre étude de Brault Foisy et des collègues (2015) a montré que les experts présentent des activations plus grandes pour le cortex préfrontal ventrolatéral et dorsolatéral lorsqu'ils regardaient des films utilisant des conceptions intuitives dans des situations qui ne sont pas conformes au concept scientifique correspondant. Cette méthode n'a cependant pas été retenue pour la présente recherche, surtout en raison du coût et de la disponibilité du matériel. Il est cependant important de remarquer que cette méthode a été utilisée avec des tâches comprenant des items incongruents et des items congruents. Cette particularité, davantage expliquée dans les sections suivantes, a cependant été retenue pour ce projet de recherche.

La littérature scientifique montre également qu'une autre méthode a été souvent utilisée pour inférer la mobilisation du contrôle inhibiteur. En effet, d'autres recherches ont utilisé les temps de réponse pour inférer la présence du contrôle inhibiteur (Ahr *et al.*, 2016; Lanoë *et al.*, 2016; Brault Foisy *et al.*, 2021). En effet, le chapitre précédent, le cadre théorique, a montré que la mise en place des mécanismes cérébraux associés à cette fonction exécutive demande du temps. En effet, plusieurs étapes sont nécessaires afin de

mobiliser le contrôle inhibiteur. Ainsi, différents réseaux de neurones doivent s'activer pour non seulement détecter un problème, mais également pour bloquer d'autres réseaux de neurones liés à l'information, dont une personne veut bloquer. Concernant ce projet de recherche, les réseaux de neurones associés aux conceptions intuitives doivent parfois être bloqués pour ensuite activer le réseau de neurones associé au concept scientifique dans certaines conditions. Dans d'autres conditions, le réseau de neurones associé à la conception intuitive devra être activé. Dans une tâche cognitive, la mobilisation du contrôle inhibiteur peut donc se refléter par des temps de réponse plus élevés que ceux d'une tâche cognitive qui ne demande pas de mobiliser le contrôle inhibiteur.

Plusieurs chercheurs ont utilisé les temps de réponse afin d'inférer la mobilisation du contrôle inhibiteur (Borst *et al.*, 2015; Ahr *et al.*, 2016; Lanoë *et al.*, 2016). Dans le domaine des sciences, Potvin et ses collègues (2017) ont utilisé les temps de réponse dans des tâches cognitives impliquant des items incongruents et des items congruents. Les temps de réponse étaient davantage élevés pour des items incongruents que pour des items congruents. Une autre étude de Brault Foisy et ses collaborateurs (2021) ont également collecté les temps de réponse dans des tâches cognitives présentant des items incongruents et des items congruents aux participants. Les résultats de cette étude indiquent aussi que les participants prenaient plus de temps à répondre à des questions portant sur des items incongruents qu'à des items congruents. De plus, les résultats suggèrent également que ces temps de réponse diminueraient selon l'âge des participants. En comparant des temps de réponse de différents items (incongruents ou congruents) dans leurs outils de collecte de données, les résultats de ces chercheurs ont permis de montrer la mobilisation de cette fonction exécutive dans l'apprentissage des sciences ainsi que dans d'autres domaines tels que les langues et les mathématiques. Comme cette mesure a permis d'obtenir des résultats significatifs pour plusieurs chercheurs, c'est cette mesure qui sera utilisée pour ce projet de recherche. De plus, les temps de réponse présentent plusieurs avantages par rapport à l'utilisation de l'IRMF. En effet, collecter cette mesure auprès des participants est non seulement moins coûteux que l'IRMF, mais il est plus facile de la collecter puisqu'elle ne demande pas l'utilisation de machines spécialisées pour l'identification de régions cérébrales spécifiques. Ces machines se trouvant dans un autre établissement, il faudrait convoquer chacun des participants à un moment précis. Ainsi, il serait impossible d'avoir un nombre élevé de participants. En plus de permettre de collecter les données de plusieurs élèves en même temps, cette méthode va permettre de le faire en classe, ce qui n'impliquera aucun déplacement de la part des parents et des élèves.

Comme les chercheurs qui ont utilisé les temps de réponse afin d'inférer la mobilisation du contrôle inhibiteur ont obtenu des résultats significatifs, la conception des tâches cognitives sera inspirée de celle utilisée dans leur recherche (Borst *et al.*, 2015; Ahr *et al.*, 2016; Lanoë *et al.*, 2016; Potvin *et al.*, 2017; Brault Foisy *et al.*, 2021). Plus précisément, les temps de réponse seront collectés dans des tâches cognitives en science impliquant des items incongruents et des items congruents. Pour ce faire, elles seront construites sous un paradigme d'amorçage négatif.

Le paradigme d'amorçage négatif provient d'une tâche qui a été utilisée afin de montrer le rôle du contrôle inhibiteur pour l'attention sélective (Tipper, 1985). La logique de ce paradigme consiste à présenter aux participants un premier item, l'amorce, dans le but d'influencer le temps de réponse à un second item, la cible. Ainsi, une tâche d'amorçage négatif comprend une série de paires d'items, amorce et cible, qui sont construites différemment dans les essais contrôle et dans les essais test (Auclair *et al.*, 2019; Brault Foisy *et al.*, 2021). Dans les essais contrôle, l'amorce est neutre, c'est-à-dire qu'elle ne fait pas appel à une conception intuitive. Ainsi, dans ce contexte, la conception intuitive n'est ni activée ni inhibée. La cible suivant cette amorce neutre est congruente, c'est-à-dire que l'activation de la conception intuitive mène à une bonne réponse. À l'opposé, dans les essais test, l'amorce est incongruente, c'est-à-dire que l'activation de la conception intuitive ne mène pas à une bonne réponse et elle doit donc être inhibée pour répondre correctement. Comme pour les essais contrôle, la cible suivant cette amorce est congruente, c'est-à-dire que la conception intuitive mène à une réponse correcte. Dans les essais test, comme la conception intuitive vient d'être inhibée à l'amorce, il sera plus difficile et il faudra plus de temps pour activer la conception intuitive et répondre correctement à la cible.

Autrement dit, la seule différence entre les essais contrôle et test se trouve au niveau du type d'amorce. Dans un essai contrôle, l'amorce ne demande pas d'utiliser ou de résister à la conception intuitive afin de répondre à la question demandée. La conception intuitive n'est donc ni activée ni inhibée, alors répondre correctement à la cible d'un essai contrôle exige simplement d'activer la conception intuitive, ce qui est relativement facile et rapide. Cependant, dans un essai test, il faut par hypothèse mobiliser le contrôle inhibiteur à l'amorce pour désactiver la conception intuitive qui mène à une réponse incorrecte, alors répondre correctement à la cible d'un essai contrôle exige de mettre fin à l'inhibition et, en plus, d'activer la conception intuitive, ce qui est plus difficile et plus long. Le Tableau 3.9 illustre les deux types d'essais, contrôle et test, respectant le concept d'amorçage négatif.

Tableau 3.9 Le paradigme d'amorçage négatif

Types d'essai	Ordre de l'item présenté aux participants	
	Amorce	Cible
Contrôle	Neutre La conception intuitive n'est ni activée ni inhibée.	Congruente La conception intuitive mène à une bonne réponse.
Test	Incongruente La conception intuitive ne mène pas à la bonne réponse. Le contrôle inhibiteur doit être mobilisé pour résister à la conception intuitive.	Congruente La conception intuitive mène à une bonne réponse.

Le raisonnement de ce paradigme suppose donc que si un item associé à une conception intuitive est inhibé en amorce, alors l'activation subséquente de cette même conception intuitive en cible devrait être plus difficile (Borst *et al.*, 2015; Roell *et al.*, 2019; Tipper, 2001; Brault Foisy *et al.*, 2021). Cette difficulté s'exprimera par les performances et par les temps de réponse. Les performances des cibles suivant une amorce incongruente (essais test) devraient donc être inférieures aux cibles suivant une amorce neutre (essais contrôle). De plus, les temps de réponse des cibles suivant une amorce incongruente devraient être supérieurs aux cibles suivant une amorce neutre.

Le cadre théorique a d'ailleurs montré que la mobilisation du contrôle inhibiteur demande du temps puisqu'elle mobilise différents mécanismes cognitifs. Ainsi, le fait d'activer une information en cible qui vient préalablement d'être inhibée en amorce demande du temps (Brault Foisy *et al.*, 2021). Comme la logique du paradigme d'amorçage négatif se base sur la comparaison de paires d'items (amorce et cible), il est important de spécifier que seuls les essais réussis seront conservés.

En plus des temps de réponse, les performances seront également collectées. Les résultats de l'étude de Brault Foisy et ses collègues (2021) ont aussi montré que les performances aux cibles étaient inférieures pour les amorces incongruentes comparativement aux amorces neutres. En effet, les performances des cibles suivant une amorce incongruente devraient également être inférieures à celles suivant une amorce neutre puisque les participants ont préalablement inhibé cette même conception intuitive lors de l'amorce.

Ainsi, une mobilisation du contrôle inhibiteur pourrait également être inférée par des différences entre les performances des essais contrôle et test.

En somme, les temps de réponse et les performances seront les données collectées dans les quatre tâches cognitives construites sous le paradigme d'amorçage négatif. La prochaine section détaille la conception de ces tâches cognitives.

3.3.2 La conception des quatre tâches cognitives

La deuxième phase du projet consiste en la conception des quatre tâches cognitives pour chacune des paires de conceptions selon le paradigme d'amorçage négatif. Afin de créer ces quatre tâches cognitives, la plateforme infonuagique *Gorilla Experiment Builder* (www.gorilla.sc) a été utilisée (Anwyl-Irvine *et al.*, 2018). Cette plateforme a permis de créer les tâches cognitives en utilisant la tâche *Task Builder 1*. De plus, comme son interface est simple et intuitive, il a été possible de concevoir les tâches en respectant le paradigme d'amorçage négatif. Sa configuration en approche modulaire a également permis d'importer la structure générale d'une tâche à une autre (Anwyl-Irvine *et al.*, 2019). Cette configuration a été bénéfique pour ce projet de recherche puisque quatre tâches différentes devaient être construites sous le même paradigme d'amorçage négatif. De plus, l'inscription à ce logiciel pour la création des tâches était gratuite. Le montant total associé à l'utilisation de la plateforme a donc uniquement concerné la collecte des données et elle a varié selon la quantité de données collectées (coût par participant). Par la suite, la collecte de données a été réalisée via des tablettes électroniques de type iPad (modèle MK2K3VC/A avec le système d'exploitation iOS 15.3.1) qui ont été apportées dans l'école secondaire. Chaque iPad était identique et possédait le même système d'exploitation.

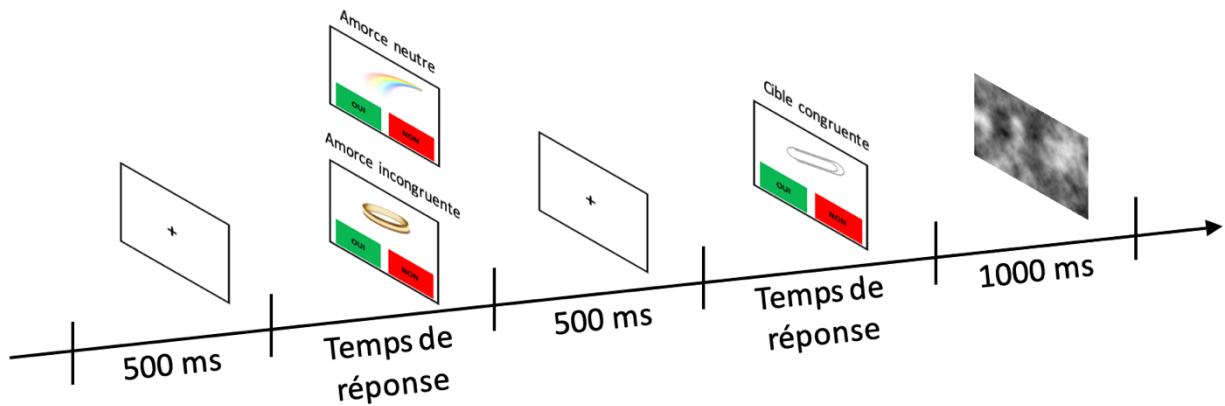
Afin d'expliquer l'élaboration des quatre tâches cognitives, la conception intuitive ainsi que le concept scientifique correspondant sur le magnétisme seront utilisés comme exemple afin de bien représenter chacune des étapes. Il est important de rappeler que la conception intuitive est que tous les métaux sont attirés par un aimant et que le concept scientifique est que seuls certains métaux sont attirés par un aimant. La première étape a été de trouver une question pour chaque tâche cognitive. Chaque question devait pouvoir être répondue de la même façon afin d'être équivalente, soit par deux boutons représentant soit Oui/Non. À titre d'exemple, la question qui a été posée aux participants pour la tâche sur le magnétisme était : « Est-ce attiré par l'aimant ? » Les participants devaient répondre à la question en pesant sur le bouton gauche (Oui) ou le bouton droit (Non) afin de sélectionner leur réponse.

La deuxième étape fut de sélectionner différentes images (items) pouvant représenter les amorces neutres, les amorces incongruentes et les cibles congruentes pour chacune des tâches. Les images utilisées dans chacune des tâches sont présentées dans les Annexes A, B, C et D. À titre d'exemple, dans la tâche cognitive sur le magnétisme, une image représentant un arc-en-ciel a été utilisée dans une amorce neutre, car le participant n'avait pas à mobiliser ou à inhiber la conception intuitive afin de répondre à la question. En effet, les participants n'ont pas à se demander s'il s'agit d'un métal pouvant être attiré par un aimant afin de répondre à la question. Pour une amorce incongruente, une image représentant une bague en or a été utilisée. Comme l'or est un métal, l'image présentée fait appel à la conception intuitive que tous les métaux sont attirés par un aimant. Cependant, l'or n'est pas une substance magnétique, et donc, l'or n'est pas attiré par un aimant. L'utilisation de cette conception intuitive ne permet donc pas de fournir une bonne réponse à la question demandée. Les participants devaient donc mobiliser le contrôle inhibiteur afin de répondre à la question. Pour une cible congruente, une image représentant un trombone en fer a été utilisée. Comme le fer est un métal, cette image fait appel à la conception intuitive. De plus, le fer est une substance magnétique. Les participants pouvaient donc utiliser la conception intuitive que tous les métaux sont attirés par un aimant et ainsi fournir une bonne réponse à la question demandée.

La troisième étape a été de construire les 60 essais de chacune des tâches cognitives à l'aide de la plateforme infonuagique *Gorilla Builder Experiment* (www.gorilla.sc). Ce nombre d'essais était nécessaire afin d'équilibrer le nombre de fois où un participant appuyait sur le bouton situé à gauche (Oui) et le nombre de fois où il appuyait sur le bouton situé à droite (Non). De plus, ce nombre a également permis d'équilibrer le nombre de fois où une image était utilisée. Pour chaque essai, un premier écran blanc, avec une croix de fixation au centre, était présenté durant 500 ms. Puis, un deuxième écran comportant une image représentant une amorce (neutre ou incongruente) et deux boutons sur lesquels les participants devaient appuyer afin de répondre à la question (Oui/Non) était présenté aux participants. À titre d'exemple, pour un essai test dans la tâche sur le magnétisme, l'image représentait une amorce incongruente, soit une bague en or, était présentée. Les participants devaient appuyer sur le bouton situé à gauche (Oui) ou le bouton situé à droite (Non) afin de répondre à la question demandée. Cette page est demeurée visible jusqu'à ce que les participants appuient sur l'un des deux boutons. Un troisième écran blanc, avec une croix au centre, était ensuite présenté durant 500 ms. S'ensuit un quatrième écran qui présentait une cible congruente. Cette page était également présentée jusqu'à ce que les participants appuient sur un bouton. Puis, un cinquième écran blanc avec une croix était présenté durant 500 ms.

Finalement, un masque visuel était présenté durant 1000 ms afin de séparer les essais. La Figure 3.2 illustre la configuration d'un essai.

Figure 3.2 Un exemple de séquence pour un essai



Pour chacune des tâches cognitives, 20 essais contrôle, 20 essais test et 20 essais de type « filler » ont été construits pour un total de 60 essais/tâche cognitive. Les 20 essais de type « filler » visent à équilibrer le nombre de réponses (Oui/Non) afin que les participants ne développent pas le réflexe d'appuyer plus souvent sur un même bouton de réponse. De plus, les participants ont réalisé une période de pratique avant d'effectuer les tâches cognitives. Ils ont ainsi pu s'habituer aux types de questions posées, aux types d'images présentées ainsi qu'à l'utilisation des boutons de réponse.

Lorsque les tâches ont été terminées, ces dernières ont été essayées par des enfants, par des élèves de niveau secondaire et par des adultes. Le but était d'abord de s'assurer que les quatre tâches cognitives étaient fonctionnelles. Puis, les moyennes des temps de réponse ont été calculées afin de vérifier s'il y avait bel et bien une différence entre les deux types d'essais (contrôle et test). Comme tout semblait bien fonctionner et que des différences au niveau des temps de réponse ont été observées, la collecte de données a pu ensuite commencer. Ainsi, la troisième phase du projet fut lancée.

3.4 La troisième phase : la collecte de données dans une école secondaire

La troisième phase de ce projet de recherche fut de collecter les données auprès d'élèves en quatrième secondaire.

3.4.1 Les modalités des visites lors de la collecte de données

Il a été possible de réaliser la collecte de données dans une seule école secondaire de la CSSMI. Les données ont été récoltées dans sept classes. Pour ce faire, deux visites d'environ 45 minutes pour chacune des classes ont été nécessaires. Lors de chacune de ces visites, des tablettes électroniques ont été apportées pour chaque participant. Ainsi, tous les participants ont utilisé le même outil technologique afin de compléter chacune des tâches cognitives. Comme les tâches cognitives devaient être réalisées de manière individuelle, des coquilles pour les oreilles ont été fournies à chaque participant. Ces coquilles fournies ont permis de diminuer le bruit et les distractions extérieurs permettant ainsi aux participants d'être davantage concentrés durant la réalisation des tâches cognitives. En outre, un code alphanumérique (exemple : SD01) a été donné à chaque participant. Ce code leur a permis de s'identifier dans le logiciel sans utiliser leur prénom ou leur nom. De plus, comme ce code était constamment visible sur la table, il était alors possible de prendre des notes sur les participants. Par exemple, on remarque que le participant SD01 arrête d'appuyer sur un des boutons puisqu'il est distrait. Il est alors possible de noter qu'il ne faut pas utiliser les données du participant SD01 puisqu'il a arrêté d'appuyer sur un des boutons.

Lors de la première visite, deux personnes étaient présentes afin de collecter les données. La première personne dirigeait chacune des classes en donnant les consignes et en expliquant les tâches. L'autre personne s'est assurée que les participants respectent les consignes en se promenant dans la classe et en prenant des notes. La prise de notes était essentielle afin de s'assurer de la validité des données recueillies. Ainsi, les participants ne respectant pas les consignes ou ceux qui ont été distraits ont pu être identifiés à l'aide de leur code alphanumérique. Au début de la première visite, les grandes lignes du projet de recherche et la nature de leur participation ont d'abord été expliquées aux participants. Le matériel (iPad, coquille et code alphanumérique inscrit sur un carton) a ensuite été distribué à chacun des participants. Puis, ils ont dû suivre les consignes tout au long de la visite. Lorsque les participants ont ouvert leur iPad, ils se sont identifiés à l'aide du code alphanumérique inscrit sur leur carton. Ils ont ensuite répondu à des questions permettant de collecter des données descriptives (âge, sexe et année scolaire). Ensuite, les participants ont réalisé deux tâches cognitives. Pour chacune des tâches cognitives, des consignes étaient d'abord données aux participants. Puis, les images de chacun des items (neutres, incongruents et congruents) ont été présentées. Ensuite, chaque participant a pu essayer la tâche en effectuant six essais de pratique. Lorsque les participants terminaient les essais de pratique et qu'ils n'avaient pas de questions, ils devaient mettre leur coquille et attendre que tout le monde commence simultanément. Lorsque les

participants ne comprenaient pas un élément, ils pouvaient alors poser des questions avant de commencer la partie de la tâche qui collectait les données.

Lors de la deuxième visite, les deux autres tâches ont été réalisées par les participants en utilisant les mêmes tablettes électroniques et en s'identifiant avec le même code alphanumérique. De plus, le déroulement pour chacune des tâches était le même que celui de la première visite. Ils devaient suivre les consignes tout au long de la visite et réaliser un essai de pratique pour chacune des tâches cognitives.

Au terme de ces deux visites, les performances ainsi que les temps de réponse ont pu être collectés à l'aide des quatre tâches cognitives construites sous le paradigme d'amorçage négatif. La quatrième phase, l'analyse des données, a alors pu être réalisée.

3.5 La quatrième phase : l'analyse des données

Il apparaît d'abord important de rappeler que seules les données collectées auprès des élèves qui ont accompli les quatre tâches cognitives ont été conservées. De plus, seuls les temps de réponse pour les questions réussies ont été conservés dans l'analyse des données. En effet, la logique du paradigme d'amorçage négatif s'appuie sur la comparaison de paires d'items (amorce et cible) qui sont construites différemment dans les essais contrôle et test. Si une conception intuitive est inhibée en amorce, alors l'activation subséquente d'un item associé à cette même conception intuitive en cible devrait être plus difficile (Borst *et al.*, 2015; Roell *et al.*, 2019; Tipper, 2001; Brault Foisy *et al.*, 2021). Il ne serait donc pas possible de comparer les performances et les temps de réponse entre les paires d'items (amorce et cible) si certains ne sont pas réussis, car il n'y aurait alors pas eu d'inhibition de la conception intuitive en amorce pour les essais test.

Au total, ce sont 119 participants qui ont pu accomplir les quatre tâches cognitives de cette étude. Cependant, d'autres données ont par la suite été enlevées avant de réaliser les analyses de variance (ANOVAs). Premièrement, les données des participants ayant un seuil de performance inférieur à 33 % ont également été enlevées. Deuxièmement, des test *t* sur les performances ont été réalisés pour tous les participants dont le seuil était entre 33 % et 60 %. En fixant la valeur standard à 50 %, cette étape a permis de s'assurer que les participants ne répondaient pas au hasard. Ainsi, les données de quelques participants n'ayant pas de moyennes significativement différentes de 0,5 ont été enlevées. Toutes les données des participants ayant un seuil de réussite supérieure à 60 % ont été conservées puisqu'ils avaient obtenu plus

de la moitié de bonnes réponses. Le Tableau 3.10 présente les caractéristiques descriptives des 44 participants dont les données ont été utilisées dans les analyses de la variance (ANOVAs).

Tableau 3.10 La synthèse des caractéristiques descriptives des 44 participants qui ont complété les quatre tâches cognitives

Genre	Nombre de participants	Âge (années)
Homme	22	16,26 (0,42)
Femme	20	16,16 (0,36)
Autre	2	15,99 (0,57)

Note. Les écarts-types apparaissent entre parenthèses.

Au terme de ces trois premières étapes, l'analyse statistique des données s'est faite par le biais de quatre analyses de la variance (ANOVA) à mesures répétées à trois facteurs. Les trois facteurs correspondent au type d'amorce (neutre ou incongruente), au niveau de familiarité de la conception intuitive (faible ou élevé) ainsi qu'au niveau de complexité du concept scientifique correspondant (faible ou élevé). Une première ANOVA à mesures répétées a été réalisée pour les performances des items en amorce. Les effets simples ont permis de vérifier si le type d'amorce a eu une influence significative sur les performances de chacune des tâches cognitives. Une deuxième ANOVA à mesures répétées a été réalisée pour les temps de réponse des items en amorce. Les effets simples ont permis de vérifier si le type d'amorce a eu une influence significative sur les temps de réponse dans chacune des tâches cognitives. De plus, un résultat significatif pour les temps de réponse selon le type d'amorces permet d'affirmer que le type d'amorce engendre un effet d'interférence. Ainsi, un test t a été réalisé afin de vérifier l'effet d'interférence pour les performances et pour les temps de réponse entre les types d'amorce (neutre et incongruente). Une troisième ANOVA à mesures répétées a été réalisée pour les performances des items en cible. Les effets simples ont permis de vérifier si le type d'amorce précédant la cible a eu une influence sur les performances des cibles dans chaque tâche cognitive. Finalement, une quatrième ANOVA à mesures répétées a été réalisée pour les temps de réponse des items en cible. Les effets simples ont également permis de vérifier si le type d'amorce précédant la cible a eu un effet sur les temps de réponse des cibles pour chaque tâche cognitive. De plus, un test t a également été réalisé afin de vérifier un effet d'amorçage négatif pour les performances et pour les temps de réponse des cibles.

Au terme de ces analyses, certains résultats sont attendus. Pour les amorces, il est d'abord attendu que les performances des amorces incongruentes soient inférieures à celles des amorces neutres (Brault Foisy *et al.*, 2021). De plus, les temps de réponse devraient également être supérieurs pour les amorces incongruentes où le contrôle inhibiteur est mobilisé que pour les amorces neutres où il ne l'est pas. Pour les cibles, il est d'abord attendu que les performances des cibles suivant une amorce incongruente devraient être inférieures à celles des cibles suivant une amorce neutre. De plus, les temps de réponse des cibles suivant une amorce incongruente devraient être supérieurs à ceux des cibles suivant une amorce neutre. Encore une fois, le fait de devoir activer un réseau de neurones lors de la cible qui vient juste d'être inhibé en amorce devrait se traduire par des temps de réponse plus élevés. Finalement, des différences au niveau des temps de réponse des cibles selon le type d'amorce permettraient d'identifier la mobilisation du contrôle inhibiteur.

3.6 Les considérations éthiques

Comme les participants de ce projet de recherche sont mineurs, le consentement pour leur participation a été obtenu via le titulaire de l'autorité parentale ou le tuteur légal. Ils ont reçu un document expliquant le projet de recherche ainsi qu'un formulaire de consentement à signer (Annexe E). Ce formulaire (2022-4092) a également été approuvé par le Comité institutionnel d'éthique de la recherche avec des êtres humains (CIEREH) le jugeant conforme aux pratiques habituelles et aux normes établies. De plus, les participants étaient en mesure de se retirer du projet en tout temps sans avoir à fournir d'explications.

De plus, les renseignements recueillis dans le cadre de ce projet, c'est-à-dire les réponses aux questions de chacune des tâches ainsi que les temps de réponse, étaient tous confidentiels. De plus, chacun des participants s'est vu attribuer un code numérique afin de s'identifier dans la plateforme infonuagique *Gorilla Experiment Builder* (www.gorilla.sc) (Anwyl-Irvine *et al.*, 2018). L'association entre le nom des participants et le code numérique se trouve uniquement dans l'ordinateur sécurisé par un mot de passe de la chercheuse principale. Les données seront d'ailleurs conservées pour une période de cinq ans après la fin du projet et elles seront par la suite détruites.

CHAPITRE 4

LES RÉSULTATS

Ce chapitre présente les résultats de cette recherche. Les données collectées auprès des élèves en quatrième secondaire sont des performances, qui correspondent au taux de bonnes réponses, ainsi que le temps qu'ils ont pris afin de répondre aux questions demandées. Par ailleurs, comme les données ont été collectées dans des tâches cognitives construites sous le paradigme d'amorçage négatif, les résultats sont décrits selon l'ordre des items présentés aux participants dans une séquence. Ainsi, les performances et les temps de réponse pour les premiers items, soit les amorces, sont détaillés dans la première partie. À cet égard, deux types d'amorce ont été présentés aux participants, soit des amorces neutres et des amorces incongruentes. De plus, cette première partie se termine par la présentation des effets d'interférence engendrés par le type d'amorce. Puis, les performances ainsi que les temps de réponse pour les deuxièmes items, soit les cibles, sont présentés dans la deuxième partie. Pour les cibles, chaque item présenté était congruent. Cependant, certains items ont suivi une amorce neutre et certains items ont suivi une amorce incongruente. De plus, les résultats de l'effet d'amorçage négatif pouvant être inféré par les différences au niveau des temps de réponse terminent la deuxième partie de ce chapitre.

4.1 L'analyse des amorces

Dans les quatre tâches cognitives, les amorces sont les premiers items présentés aux participants dans une séquence. Il existe deux types d'amorces : les amorces neutres pour lesquelles la conception intuitive n'est pas mobilisée (ni activée ni inhibée) et les amorces incongruentes pour lesquelles le fait de s'appuyer sur une conception intuitive ne mène pas à la bonne réponse. Par conséquent, les participants doivent mobiliser le contrôle inhibiteur pour répondre à la question demandée pour les amorces incongruentes. Les performances, qui correspondent aux taux de bonnes réponses, sont d'abord présentées. Puis, les temps de réponse selon chaque type d'amorce sont décrits. Finalement, les effets d'interférence pouvant être provoqués par le type d'amorce terminent cette partie.

4.1.1 Les performances

Les performances correspondent au taux de bonnes réponses pour chaque type d'amorce dans les quatre tâches cognitives et elles sont présentées dans le Tableau 4.1. Pour les conditions expérimentales 1 (F↓C↓), 3 (F↓C↑) et 4 (F↑C↑), les résultats montrent que les performances des amorces neutres sont supérieures à

celles des amorces incongruentes. Pour les amorces neutres de ces trois conditions expérimentales, les performances sont supérieures à 0,95 alors qu'elles sont inférieures à 0,80 pour les amorces incongruentes. Ces résultats étaient attendus puisqu'il est normal que les participants commettent moins d'erreurs lorsqu'aucune conception intuitive n'est mobilisée et davantage d'erreurs lorsqu'ils doivent inhiber une conception intuitive afin de répondre à la question demandée. Cependant, les performances des amorces incongruentes sont supérieures à celle des amorces neutres pour la condition expérimentale 2 (F↑C↓). La performance des amorces incongruentes est de 0,94 alors qu'elle est de 0,93 pour les amorces neutres.

Tableau 4.1 Les performances des items en amorce en fonction du type d'amorce et des variables didactiques

Conditions expérimentales	Variables didactiques		Moyennes des performances	
	Niveau de familiarité	Niveau de complexité	Amorces neutres	Amorces incongruentes
1	Faible (↓)	Faible (↓)	0,99 (0,02)	0,75 (0,24)
2	Élevé (↑)	Faible (↓)	0,93 (0,13)	0,94 (0,13)
3	Faible (↓)	Élevé (↑)	0,96 (0,07)	0,79 (0,21)
4	Élevé (↑)	Élevé (↑)	0,95 (0,07)	0,65 (0,23)

Note. Les écarts-types apparaissent entre parenthèses.

Afin de vérifier l'interaction entre le type d'amorce, la variable didactique *familiarité* et la variable didactique *complexité*, une analyse de variance (ANOVA) à mesures répétées à trois facteurs a été réalisée. Les résultats de cette ANOVA sont présentés dans le Tableau 4.2. On constate qu'il y a une triple interaction significative entre les trois facteurs ($F(1,43) = 30,484; p < 0,001; \eta_p^2 = 0,415$). De plus, les doubles interactions entre le type d'amorce et la familiarité ($F(1,43) = 4,334; p = 0,043; \eta_p^2 = 0,092$), entre le type d'amorce et la complexité ($F(1,43) = 19,157; p < 0,001; \eta_p^2 = 0,308$), entre la familiarité et la complexité ($F(1,43) = 12,162; 0,001; \eta_p^2 = 0,220$) sont également toutes significatives.

Tableau 4.2 Les effets d'interaction et les effets principaux de l'ANOVA à mesures répétées des performances en amorce

Cas	Somme des carrés	dl	Moyenne des carrés	F	p	η_p^2
Type d'amorce	2,713	1	2,713	124,942	< 0,001	0,744
Familiarité	0,003	1	0,003	0,132	0,718	0,003
Complexité	0,405	1	0,405	21,917	< 0,001	0,338
Type d'amorce*Familiarité	0,078	1	0,078	4,334	0,043	0,092
Type d'amorce*Complexité	0,268	1	0,268	19,157	< 0,001	0,308
Familiarité*Complexité	0,457	1	0,457	12,162	0,001	0,220
Type d'amorce *Familiarité*Complexité	0,808	1	0,808	30,484	< 0,001	0,415

Note. Somme des carrés de types III.

Comme il y a une triple interaction significative, les effets simples permettent de vérifier si le type d'amorce, neutre ou incongruente, a une influence significative sur les performances selon les niveaux de familiarité et de complexité. Ces effets sont présentés dans le Tableau 4.3. Pour les conditions expérimentales 1 (F↓C↓), 3 (F↓C↑) et 4 (F↑C↑), le type d'amorce a une influence significative sur les performances. Cependant, le type d'amorce n'a pas d'influence significative lorsque le niveau de familiarité est élevé et lorsque le niveau de complexité est faible, ce qui correspond à la condition expérimentale 2 (F↑C↓).

Tableau 4.3 Les effets simples de l'ANOVA à mesures répétées du type d'amorce sur les performances en amorce

Conditions expérimentales	Variables didactiques		Somme des carrés	dl	Moyenne des carrés	F	p
	Niveau de familiarité	Niveau de complexité					
1	Faible (↓)	Faible (↓)	1,330	1	1,330	44,983	< ,001
2	Élevé (↑)	Faible (↓)	6,011 x 10 ⁻⁴	1	6,011 x 10 ⁻⁴	0,191	0,664
3	Faible (↓)	Élevé (↑)	0,597	1	0,597	29,971	< ,001
4	Élevé (↑)	Élevé (↑)	1,938	1	1,938	70,322	< ,001

Note. Somme des carrés de type III.

4.1.2 Les temps de réponse

Les temps de réponse correspondent au temps entre le moment où l'amorce apparaît sur l'écran du participant jusqu'au moment où le participant appuie sur le bouton de réponse (Oui/Non) afin de répondre à la question demandée dans la tâche cognitive. Le Tableau 4.4 présente les temps de réponse pour chaque type d'amorce dans les quatre tâches cognitives. Il est anticipé que les temps de réponse des amorces incongruentes soient supérieurs à ceux des amorces neutres. En effet, les participants devraient prendre davantage de temps pour répondre à une question lorsqu'une conception intuitive est mobilisée et qu'elle doit être bloquée que lorsqu'elle n'est aucunement mobilisée. Les résultats montrent que les temps de réponse pour les amorces incongruentes sont en effet significativement supérieurs à ceux des amorces neutres pour les conditions expérimentales 1 (F↓C↓) et 4 (F↑C↑). Cependant, c'est l'inverse pour les conditions expérimentales 2 (F↑C↓) et 3 (F↓C↑). Les temps de réponse sont supérieurs pour les amorces neutres que ceux des amorces incongruentes. De plus, cette différence est significative pour la condition expérimentale 2 (F↑C↓). Pour la condition expérimentale 3 (F↓C↑), il n'a pas été possible d'observer des différences significatives entre les temps de réponse des deux types d'amorce.

Tableau 4.4 Les temps de réponse (ms) des items en amorce en fonction du type d'amorce et des variables didactiques

Conditions expérimentales	Variables didactiques		Moyennes des temps de réponse (ms)	
	Niveau de familiarité	Niveau de complexité	Amorces neutres	Amorces incongruentes
1	Faible (↓)	Faible (↓)	625 (123)	701 (148)
2	Élevé (↑)	Faible (↓)	675 (118)	637 (95)
3	Faible (↓)	Élevé (↑)	1072 (322)	1040 (315)
4	Élevé (↑)	Élevé (↑)	829 (164)	1451 (488)

Note. Les écarts-types apparaissent entre parenthèses.

Afin de vérifier l'effet du type d'amorce sur les temps de réponse, selon les niveaux de familiarité et de complexité, une analyse de variance à mesures répétées à trois facteurs a été réalisée. Les résultats montrent un effet d'interaction triple significatif ($F(1,43) = 97,688; p < 0,001; \eta_p^2 = 0,694$). De plus, les interactions doubles entre le type d'amorce et la familiarité ($F(1,43) = 57,573; p < 0,001; \eta_p^2 = 0,572$) ainsi qu'entre le type d'amorce et la complexité ($F(1,43) = 73,582; p < 0,001; \eta_p^2 = 0,631$) sont significatives. Ces résultats sont présentés dans le Tableau 4.5.

Tableau 4.5 Les effets d'interaction et les effets principaux de l'ANOVA à mesures répétées des temps de réponse en amorce

Cas	Somme des carrés	dl	Moyenne des carrés	F	p	η_p^2
Type d'amorce	2,168 x 10 ⁶	1	2,168 x 10 ⁶	85,261	< 0,001	0,665
Familiarité	132 985,544	1	132 985,544	1,767	0,191	0,039
Complexité	1,691 x 10 ⁷	1	1,691 x 10 ⁷	208,968	< 0,001	0,829
Type d'amorce*Familiarité	1,602 x 10 ⁶	1	1,602 x 10 ⁶	57,573	< 0,001	0,572
Type d'amorce*Complexité	1,671 x 10 ⁶	1	1,671 x 10 ⁶	73,582	< 0,001	0,631
Familiarité*Complexité	181 773,185	1	181 773,185	2,770	0,103	0,061
Type d'amorce *Familiarité*Complexité	3,253 x 10 ⁶	1	3,253 x 10 ⁶	97,688	< 0,001	0,694

Note. Somme des carrés de types III.

En plus des effets principaux, les effets simples de l'interaction triple permettent d'observer que le type d'amorce, neutre ou incongruente, a un effet significatif sur les temps de réponse pour les conditions expérimentales 1 (F↓C↓), 2 (F↑C↓) et 4 (F↑C↑). Cependant, le type d'amorce n'a pas d'effet significatif lorsque la familiarité est faible et lorsque la complexité est élevée, ce qui correspond à la condition expérimentale 3 (F↓C↑). Les résultats des effets simples sont présentés dans le Tableau 4.6.

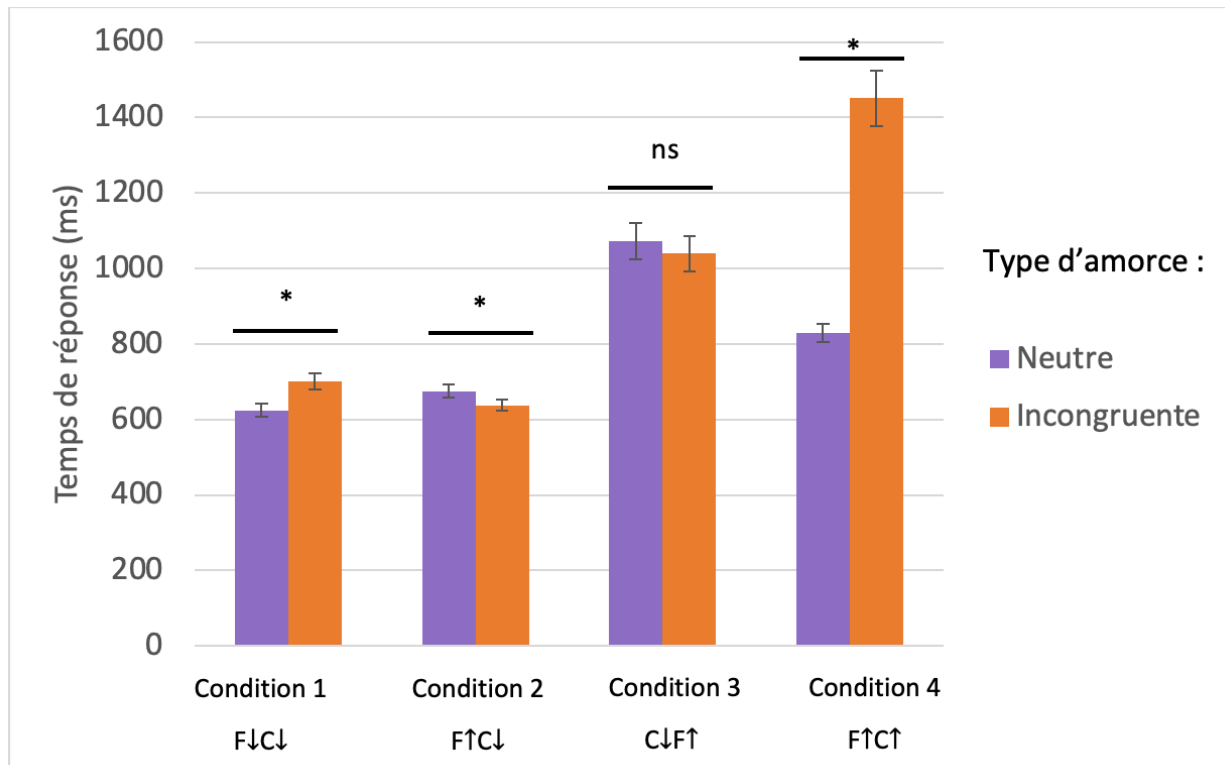
Tableau 4.6 Les effets simples de l'ANOVA à mesures répétées du type d'amorce sur les temps de réponse en amorce

Conditions expérimentales	Variables didactiques		Somme des carrés	dl	Moyenne des carrés	F	p
	Niveau de familiarité	Niveau de complexité					
1	Faible (↓)	Faible (↓)	128 775,211	1	128 775,211	28,857	< 0,001
2	Élevé (↑)	Faible (↓)	32 075, 782	1	32 075, 782	13,093	< 0,001
3	Faible (↓)	Élevé (↑)	23 100,876	1	23 100,876	1,307	0,259
4	Élevé (↑)	Élevé (↑)	8,509 x 10 ⁶	1	8,509 x 10 ⁶	100,503	< 0,001

Note. Somme des carrés de type III.

La Figure 4.1 illustre ces résultats sous la forme d'un graphique.

Figure 4.1 Les temps de réponse (ms) des items en amorce en fonction du type d'amorce et des variables didactiques



Note. Les effets reportés sont significatifs au seuil $p < 0,001$; ns : effets non significatifs. Les barres d'erreurs indiquent les erreurs standard de la moyenne.

4.1.3 Les effets d'interférence

Le Tableau 4.7 présente les effets d'interférence observés pour les quatre conditions expérimentales. Pour les performances, cet effet est obtenu en effectuant une soustraction entre les performances des amorces neutres et les performances des amorces incongruentes. Il est anticipé qu'il y ait un effet significatif entre les performances selon le type d'amorce. En effet, les performances des amorces neutres devraient être supérieures à celles des amorces incongruentes. Comme les participants devaient mobiliser le contrôle inhibiteur uniquement pour les amorces incongruentes, leur performance est plus susceptible d'être plus basse. Les résultats montrent que cet effet est présent pour les conditions expérimentales 1 (F↓C↓), 3 (F↓C↑) et 4 (F↑C↑) et il ne semble pas avoir d'effets d'interférence significatifs pour la condition expérimentale 2 (F↑C↓). Pour les temps de réponse, un effet d'interférence est également trouvé de façon similaire, c'est-à-dire en soustrayant les temps de réponse aux amorces incongruentes et aux amorces neutres. Comme les temps de réponse devraient être plus élevés pour les amorces incongruentes que les amorces neutres, un effet d'interférence est donc anticipé. Pour les conditions expérimentales 1 (F↓C↓), 2 (F↑C↓) et 4 (F↑C↑), l'effet d'interférence est significatif pour les temps de réponse. Il est également possible d'observer que la valeur est négative pour la condition expérimentale 2 (F↑C↓). Ceci appuie les résultats précédents que les temps de réponse étaient plus élevés pour les amorces neutres que les amorces incongruentes dans le Tableau 4.4. Finalement, il n'est cependant pas possible d'observer une interférence significative au niveau des temps de réponse pour la condition expérimentale 3 (F↓C↑).

Tableau 4.7 Les effets d'interférence en amorce

Conditions expérimentales	Variables didactiques		Effets d'interférence	
	Niveau de familiarité	Niveau de complexité	Performance	Temps de réponse
1	Faible (↓)	Faible (↓)	0,25 (0,24)	77 (94)
2	Élevé (↑)	Faible (↓)	ns	-38 (70)
3	Faible (↓)	Élevé (↑)	0,17 (0,20)	ns
4	Élevé (↑)	Élevé (↑)	0,30 (0,23)	622 (412)

Note. Les écarts-types apparaissent entre parenthèses. Les effets reportés sont significatifs au seuil $p < 0,05$; ns : effets non significatifs.

4.2 L'analyse des cibles

Dans les quatre tâches cognitives, les cibles sont les deuxièmes items présentés aux participants. Pour les deux conditions (test et contrôle), les cibles sont congruentes, c'est-à-dire que l'utilisation de la conception intuitive afin de répondre à la question mène à une bonne réponse. Cependant, certaines cibles suivent une amorce neutre où la conception intuitive n'est pas mobilisée (ni activée ni inhibée) alors que d'autres cibles suivent une amorce incongruente pour laquelle le fait de s'appuyer sur une conception intuitive ne mène pas à la bonne réponse.

4.2.1 Les performances

Les performances correspondent au taux de bonnes réponses pour les cibles des quatre tâches cognitives. Les cibles de la condition contrôle sont les cibles qui suivent une amorce neutre alors que les cibles de la condition test sont les cibles qui suivent une amorce incongruente. Ces performances sont présentées dans le Tableau 4.8. Il est anticipé que les performances des cibles suivant une amorce incongruente soient inférieures aux cibles suivant une amorce neutre. En effet, pour les cibles suivant une amorce incongruente, les participants ont dû préalablement inhiber une conception intuitive qui ne permettait pas de donner une bonne réponse. Comme cette même conception intuitive donne peut ensuite mener à une bonne réponse, ce traitement devrait affecter les performances des participants. Seulement deux conditions expérimentales respectent ces résultats anticipés. Pour les conditions expérimentales 3 (F↓C↑) et 4 (F↑C↑), les performances des cibles suivant une amorce incongruente sont donc inférieures à celles suivant une amorce neutre. Pour les deux autres conditions expérimentales, 1 (F↓C↓) et 2 (F↑C↓), ce sont les performances des cibles suivant une amorce neutre qui sont supérieures à celles suivant une amorce neutre.

Tableau 4.8 Les performances des items en cible en fonction du type d’amorce et des variables didactiques

Conditions expérimentales	Variables didactiques		Moyennes des performances	
	Niveau de familiarité	Niveau de complexité	Cibles suivant une amorce neutre	Cibles suivant une amorce incongruente
1	Faible (↓)	Faible (↓)	0,97 (0,05)	0,97 (0,06)
2	Élevé (↑)	Faible (↓)	0,96 (0,06)	0,97 (0,05)
3	Faible (↓)	Élevé (↑)	0,96 (0,10)	0,95 (0,10)
4	Élevé (↑)	Élevé (↑)	0,92 (0,13)	0,89 (0,13)

Note. Les écarts-types apparaissent entre parenthèses.

Le Tableau 4.9 présente les résultats de l’ANOVA à mesures répétées. Pour les performances des cibles, il n’y a pas de triple interaction significative. Les résultats montrent qu’il y a une double interaction significative uniquement pour le type d’amorce et la complexité ($F(1,43) = 4,136; p = 0,048; \eta_p^2 = 0,088$). Ainsi, le type d’amorce semble avoir une influence sur les performances uniquement lorsque le niveau de complexité change. En observant les effets simples de cette double interaction dans le Tableau 4.10, les résultats montrent qu’il n’y a pas de différence significative entre les performances des cibles selon le niveau de complexité des tâches cognitives.

Tableau 4.9 Les effets d'interaction et les effets principaux de l'ANOVA à mesures répétées des performances en cible

Cas	Somme des carrés	dl	Moyenne des carrés	F	p	η_p^2
Type d'amorce	0,002	1	0,002	0,446	0,508	0,010
Familiarité	0,074	1	0,074	6,196	0,017	0,126
Complexité	0,138	1	0,138	13,688	< 0,001	0,241
Type d'amorce*Familiarité	$1,026 \times 10^{-4}$	1	$1,026 \times 10^{-4}$	0,018	0,893	$4,235 \times 10^{-4}$
Type d'amorce*Complexité	0,014	1	0,014	4,136	0,048	0,088
Familiarité*Complexité	0,040	1	0,040	3,494	0,068	0,075
Type d'amorce *Familiarité*Complexité	0,007	1	0,007	1,348	0,252	0,030

Note. Somme des carrés de types III.

Tableau 4.10 Les effets simples de l'ANOVA à mesures répétées du type d'amorce sur les performances en cible

Variable didactique	Somme des carrés	dl	Moyenne des carrés	F	p
Niveau de complexité					
Faible (↓)	0,003	1	0,003	1,152	0,289
Élevé (↑)	0,013	1	0,013	2,375	1,31

Note. Somme des carrés de type III.

4.2.2 Les temps de réponse

Les temps de réponse correspondent au temps entre le moment où la cible apparaît sur l'écran du participant jusqu'au moment où le participant appuie sur le bouton de réponse (Oui/Non) afin de répondre

à la question demandée dans la tâche cognitive. Le tableau 4.11 présente les temps de réponse des cibles selon l’amorce qu’ils suivent. Il est anticipé que les temps de réponse soient supérieurs pour les cibles suivant une amorce incongruente que les cibles suivant une amorce neutre. En effet, les participants ont dû mobiliser des réseaux de neurones afin d’inhiber les réseaux de neurones associés à une conception intuitive lors de l’amorce. Peu de temps après avoir inhibé la conception intuitive, les participants doivent ensuite activer ces mêmes réseaux de neurones associés à la conception intuitive. Ce traitement demande un certain temps. Les résultats montrent que les conditions expérimentales 2 (F↑C↓), 3 (F↓C↑) et 4 (F↑C↑) ont des temps de réponse plus élevés pour les cibles suivant une amorce incongruente que les cibles suivant une amorce neutre. Cependant, ce n’est pas le cas pour la condition expérimentale 1 (F↓C↓) où les temps de réponse sont plus élevés pour les cibles suivant une amorce neutre que celles suivant une amorce incongruente.

Tableau 4.11 Les temps de réponse (ms) des items en cible en fonction du type d’amorce et des variables didactiques

Conditions expérimentales	Variables didactiques		Moyennes des temps de réponse (ms)	
	Niveau de familiarité	Niveau de complexité	Cibles suivant une amorce neutre	Cibles suivant une amorce incongruente
1	Faible (↓)	Faible (↓)	629 (108)	627 (115)
2	Élevé (↑)	Faible (↓)	590 (85)	600 (122)
3	Faible (↓)	Élevé (↑)	776 (222)	804 (221)
4	Élevé (↑)	Élevé (↑)	1047 (321)	1210 (468)

Note. Les écarts-types apparaissent entre parenthèses.

Afin de vérifier l’influence du type d’amorce sur les temps de réponse en fonction des niveaux de familiarité et de complexité, une autre analyse de variance à mesures répétées à trois facteurs a été réalisée. Les résultats du Tableau 4.12 montrent qu’il y a une triple interaction significative ($F(1,43) = 5,905$; $p = 0,019$; $\eta_p^2 = 0,121$). Les effets simples de cette triple interaction du Tableau 4.13 permettent d’observer qu’il y a une différence significative liée au type d’amorce uniquement pour la condition expérimentale 4 (F↑C↑). Cela indique donc que le type d’amorce précédant la cible a une influence significative uniquement lorsque la familiarité et la complexité sont élevées. Pour les conditions

expérimentales 1 (F↓C↓), 2 (F↑C↓) et 3 (F↓C↑), le type d’amorce ne semble pas avoir d’effet significatif sur les temps de réponse des cibles.

Tableau 4.12 Les effets d’interaction et les effets principaux de l’ANOVA à mesures répétées des temps de réponse en cible

Cas	Somme des carrés	dl	Moyenne des carrés	F	p	η_p^2
Type d’amorce	214 155,836	1	214 155,836	25,653	< 0,001	0,374
Familiarité	2,056 x 10 ⁶	1	2,056 x 10 ⁶	30,676	< 0,001	0,416
Complexité	1,064 x 10 ⁷	1	1,064 x 10 ⁷	133,235	< 0,001	0,756
Type d’amorce*Familiarité	117 360,307	1	117 360,307	8,351	0,006	0,163
Type d’amorce*Complexité	182 053,258	1	182 053,258	16,445	< 0,001	0,277
Familiarité*Complexité	3,039 x 10 ⁶	1	3,039 x 10 ⁶	38,105	< 0,001	0,470
Type d’amorce *Familiarité*Complexité	84 298,825	1	84 282,825	5,905	0,019	0,121

Note. Somme des carrés de types III.

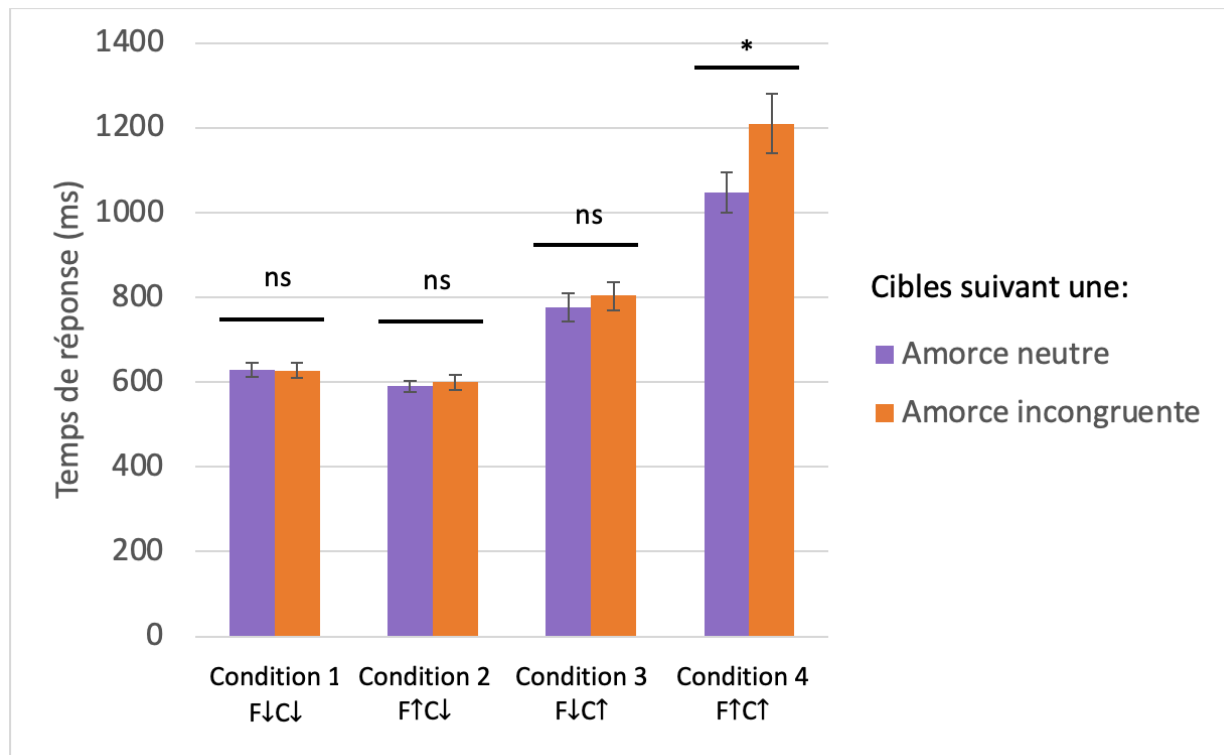
Tableau 4.13 Les effets simples de l'ANOVA à mesures répétées du type d'amorce sur les temps de réponse en cible

Conditions expérimentales	Variables didactiques		Somme des carrés	df	Moyenne des carrés	F	p
	Niveau de familiarité	Niveau de complexité					
1	Faible (↓)	Faible (↓)	65,154	1	65,154	0,039	0,844
2	Élevé (↑)	Faible (↓)	1 950,506	1	1 950,506	0,848	0,362
3	Faible (↓)	Élevé (↑)	16 451,299	1	16 451,299	2,265	0,140
4	Élevé (↑)	Élevé (↑)	579 401,267	1	579 401,267	15,863	< 0,001

Note. Somme des carrés de type III.

La Figure 4.2 illustre ces résultats sous la forme d'un graphique.

Figure 4.2 Les temps de réponse (ms) des items en cible en fonction du type d'amorce et des variables didactiques.



Note. Les effets reportés sont significatifs au seuil $p < 0,001$; ns : effets non significatifs. Les barres d'erreurs indiquent les erreurs standard de la moyenne.

4.2.3 L'effet d'amorçage négatif

Le Tableau 4.14 présente pour sa part les effets d'amorçage négatif pour les quatre conditions expérimentales. Cet effet est obtenu en effectuant une soustraction des performances des cibles suivant une amorce neutre et suivant une amorce incongruente ou entre les temps de réponse des cibles suivant une amorce incongruente et de celles suivant une amorce neutre. Lorsqu'un effet est présent, il est alors possible d'inférer la mobilisation du contrôle inhibiteur. Les résultats montrent que l'effet d'amorçage est significatif uniquement pour la condition expérimentale 4 (F↑C↑). Un effet a également été trouvé pour les performances des conditions expérimentales expérimentales 3 (F↓C↑) et 4 (F↑C↑). Bien que cet effet soit faible, le type d'amorce aurait donc eu une influence sur les performances lorsque la complexité est élevée.

Tableau 4.14 Les effets d'amorçage négatif en cible

Conditions expérimentales	Variables didactiques		Effets d'amorçage négatif	
	Niveau de familiarité	Niveau de complexité	Performance	Temps de réponse
1	Faible (↓)	Faible (↓)	ns	ns
2	Élevé (↑)	Faible (↓)	ns	ns
3	Faible (↓)	Élevé (↑)	0,01 (0,09)	ns
4	Élevé (↑)	Élevé (↑)	0,03 (0,14)	162 (270)

Note. Les écarts-types apparaissent entre parenthèses. Les effets reportés sont significatifs au seuil $p < 0,05$; ns : effets non significatifs.

CHAPITRE 5

LA DISCUSSION

Ce chapitre discute des résultats présentés dans le chapitre 4 afin de répondre à la question de recherche suivante : est-ce que la familiarité des conceptions intuitives et la complexité de leur concept scientifique correspondant influencent le niveau de contrôle inhibiteur requis pour répondre à des questions portant sur des concepts scientifiques associés à des conceptions intuitives fréquentes au secondaire?

L'hypothèse générale émise au départ était que le recours au contrôle inhibiteur serait modulé à la fois par le niveau de *familiarité* de la conception intuitive et par le niveau de *complexité* du concept scientifique. Ainsi, plus le niveau de familiarité de la conception intuitive est élevé, plus il serait exigeant de résister à l'utilisation de cette conception intuitive. En outre, plus le degré de complexité du concept scientifique correspondant est élevé, plus l'effort nécessaire à son appréhension et à son éventuelle sélection serait également grand.

Dans un premier temps, les liens entre les résultats sur les amorces et les résultats d'études antérieures seront présentés. Puis, les résultats de ce projet seront interprétés afin de vérifier si le type d'amorce, neutre ou incongruente, engendre un effet d'interférence ou non. Dans un deuxième temps, les liens entre les résultats sur les cibles et les résultats d'études antérieures seront présentés. Les résultats sur les cibles de ce projet seront ensuite interprétés afin de vérifier s'il est possible d'inférer ou non un effet d'amorçage négatif. Dans un troisième temps, la confirmation ou non des hypothèses de recherche permettant de répondre à la question sera ensuite présentée. Puis, les retombées possibles des résultats sur l'enseignement des sciences au secondaire seront abordées. Finalement, les limites de ce projet de recherche seront présentées.

5.1 La discussion sur les amorces

Les résultats montrent que le type d'amorce, neutre ou incongruente, a un effet sur les performances et sur les temps de réponse pour certaines conditions expérimentales. Lorsque cet effet est significatif, il est alors possible d'observer un effet d'interférence au niveau des amorces.

Dans un premier temps, les résultats montrent que les performances des amorces incongruentes sont inférieures à celles des amorces neutres pour les conditions expérimentales 1 (F↓C↓), 3 (F↓C↑) et 4 (F↑C↑).

Ces résultats confirment que les participants commettent un plus grand nombre d'erreurs lorsque les items présentés sont associés à une conception intuitive qui ne mène pas à une bonne réponse que lorsque les items ne font pas appel à la conception intuitive. Ces résultats étaient attendus puisque la littérature scientifique montre que les performances d'items incongruents sont inférieures à celles d'items neutres (Babai et Amsterdamer, 2008; Brault Foisy *et al.*, 2021; Roell *et al.*, 2019; Shtulman et Valcarcel, 2012). L'étude de Brault Foisy et ses collègues (2021) a également obtenu des résultats similaires dans des tâches également construites sous le paradigme d'amorçage négatif. Pour différents groupes d'âge (enfants, adolescents et adultes), les performances des amorces très incongruentes étaient aussi inférieures à celles des amorces neutres. En effet, le cadre théorique a montré que les participants doivent mobiliser le contrôle inhibiteur afin de bloquer l'utilisation d'une conception intuitive associée à l'item incongruent (Brault Foisy *et al.*, 2021; Masson *et al.*, 2014). Ainsi, une amorce incongruente demande aux participants de devoir résister à mobiliser une conception intuitive alors que ce n'est pas le cas pour une amorce neutre pour laquelle aucune conception intuitive n'est associée. Les participants risquent donc davantage de se tromper pour les amorces incongruentes, et donc, d'avoir de plus faibles performances pour ce type d'amorce.

Pour la deuxième condition expérimentale ($F \uparrow C \downarrow$), les performances des amorces incongruentes (performance moyenne : 0,94) ne sont pas inférieures à celles des amorces neutres (performance moyenne : 0,93). Ce résultat n'était pas attendu puisque, selon le paradigme d'amorçage négatif, les items neutres ne mobilisent pas ou ne demandent pas d'inhiber une conception intuitive (Brault Foisy *et al.*, 2021). Ainsi, les participants devraient avoir un meilleur taux de bonnes réponses pour les amorces neutres que celui des amorces incongruentes. Le résultat obtenu pour cette condition expérimentale est donc différent de ceux d'autres études présentées dans la section précédente (Babai et Amsterdamer, 2008; Brault Foisy *et al.*, 2021; Roell *et al.*, 2019; Shtulman et Valcarcel, 2012). Cette tâche cognitive impliquant un haut niveau de familiarité de la conception intuitive et un faible niveau de complexité du concept scientifique concerne les états de la matière. La conception intuitive est que les solides sont rigides et le concept scientifique associé est que certains solides ne sont pas rigides. La question demandée dans cette tâche cognitive est la suivante : est-ce un liquide? Les items des amorces neutres sont un faisceau de lumière ainsi qu'une flamme (Annexe B). La lumière est une onde électromagnétique et une flamme est le résultat d'une réaction de combustion dans laquelle des gaz sont produits et de l'énergie est dégagée. Les items des amorces incongruentes sont du miel, de la pâte à modeler et du sable (Annexe B). Le miel est à l'état liquide; la pâte à modeler est à l'état solide et le sable est à l'état solide. Les items des cibles

congruentes sont du café, du lait, une roche, un morceau de bois et du jus d'orange (Annexe B). Le café est à l'état liquide; le lait est à l'état liquide; la roche est à l'état solide; le morceau de bois est à l'état solide et le jus d'orange est à l'état liquide. Il est donc possible d'observer que la nature des items neutres (onde électromagnétique et résultat d'une combustion, qui sont des éléments intangibles) est différente des items incongruents et congruents (qui sont des objets physiques tangibles). Cette différence peut donc avoir eu un impact sur le traitement de ces items neutres par les participants. Il est possible que les participants aient été confus et surpris lorsqu'ils ont vu une flamme ou un faisceau de lumière apparaître sur l'écran. Il est possible que cet effet de confusion et de surprise ait pu se traduire par de mauvaises performances pour les items neutres. Cette différence au niveau des items provient des choix de la méthodologie de ce projet de recherche. Comme les tâches cognitives ont été construites sous le paradigme d'amorçage négatif, des items neutres ne faisant pas appel à la conception intuitive de la tâche devaient être trouvés. Puisque la conception intuitive (les solides sont rigides) concerne directement les états de la matière (solide, liquide, gaz), les items neutres devaient donc ne pas correspondre à ces états de la matière. Il a donc été difficile de trouver des items neutres et le choix final fut un faisceau de lumière ainsi qu'une flamme. De plus, comme ce projet de recherche fait partie d'un plus grand projet mené par la chercheuse Lorie-Marlène Brault Foisy (UQAM), cette tâche cognitive a également été utilisée auprès d'enfants. Les items devaient donc correspondre à des objets ou des éléments connus des enfants. Ce critère supplémentaire a donc rendu encore plus difficile l'étape de détermination des items. Une autre explication concerne le besoin de mobilisation du contrôle inhibiteur. Il est possible que le niveau de mobilisation fût nul ou faible, ne pouvant alors pas être observable dans les performances. Pour cette condition expérimentale, le niveau de complexité du concept scientifique est faible.

Dans un deuxième temps, les résultats montrent que les temps de réponse des amorces incongruentes sont supérieurs à celles des amorces neutres pour les conditions expérimentales 1 (F↓C↓) et 4 (F↑C↑). Les participants ont donc pris davantage de temps pour répondre à la question lorsque l'item présenté faisait appel à une conception intuitive ne menant pas à une bonne réponse que lorsque l'item ne faisait pas appel à la conception intuitive. Comme le contrôle inhibiteur doit être mobilisé uniquement lors des amorces incongruentes, il est anticipé que les temps de réponse soient plus élevés pour ce type d'amorce. En effet, mobiliser cette fonction exécutive demande du temps puisque plusieurs réseaux de neurones sont nécessaires. Les participants doivent activer des réseaux de neurones permettant de bloquer ceux associés à la conception intuitive (Houdé, 2014). De plus, ils doivent ensuite mobiliser le réseau de neurones associé au concept scientifique qui permet de répondre à la question. Ces résultats appuient

ceux d'un grand nombre de recherches qui ont également montré que les temps de réponse sont plus élevés pour les items incongruents (Babai et Amsterdamer, 2008; Babai *et al.*, 2010; Brault Foisy *et al.*, 2021; Lubin *et al.*, 2023; Potvin *et al.*, 2015; Shtulman et Valcarcel, 2012; Stavy et Babai, 2008) que pour les items neutres. Encore une fois, l'étude de Brault Foisy et ses collaborateurs (2021) a également obtenu des résultats similaires pour une tâche cognitive également construite sous le paradigme d'amorçage négatif. Pour différents groupes d'âge (enfants, adolescents et adultes), les temps de réponse des amorces très incongruentes sont supérieurs à ceux des amorces neutres.

Ce résultat attendu ne se reflète cependant pas pour les conditions expérimentales 2 (F↑C↓) et 3 (F↓C↑). Comme pour les performances des amorces, il est possible que la nature des items de la condition expérimentale 2 (F↑C↓) ait eu une influence sur les temps de réponse des amorces neutres. Un effet de surprise, de confusion ou d'hésitation chez les participants peut ainsi s'être traduit par des temps de réponse plus élevés pour les amorces neutres. Une autre hypothèse pouvant expliquer ce résultat inattendu concerne la mobilisation du contrôle inhibiteur permettant de ne pas activer la conception intuitive dont le niveau de complexité est faible. En effet, il est possible que cette tâche cognitive ne demandait pas, ou légèrement, aux adolescents de mobiliser le contrôle inhibiteur. Ainsi, il n'a pas été possible de détecter des différences statistiquement significatives afin d'inférer par la suite la mobilisation du contrôle inhibiteur. Pour la condition expérimentale 3 (F↓C↑), la nature des items était également très différente de celles des autres tâches. Cette tâche cognitive impliquant un faible niveau de familiarité de la conception intuitive et un haut niveau de complexité du concept scientifique concerne le système Terre-Lune-Soleil. La conception intuitive est que le Soleil et la Lune sont à des distances similaires de la Terre et le concept scientifique est que le Soleil est environ 400x plus loin de la Terre que de la Lune. La question demandée dans cette tâche cognitive est la suivante : est-ce que ces deux éléments sont environ à la même distance de toi? Une première différence avec les autres tâches est qu'un item (neutre, incongruent ou congruent) présente deux images simultanément au lieu d'une seule. Ainsi, les items des amorces neutres sont un oiseau avec une Lune ainsi qu'une Lune avec un Soleil (Annexe C). Les items des amorces incongruentes sont un avion avec un aigle ainsi qu'une Lune avec un Soleil (Annexe C). Les items des amorces congruentes sont un aigle avec un faucon, un Boeing avec un Airbus, un monarque avec un morpho bleu, la planète Saturne avec la Lune, un morpho bleu avec un Airbus ainsi que deux cumulus (Annexe C). De plus, la taille d'une même image (exemple : un Airbus) varie. Dans un premier temps, les résultats montrent que tous les temps de réponse sont généralement plus élevés dans cette tâche cognitive que ceux dans les autres tâches cognitives. Ceci peut s'expliquer par le fait que les participants

doivent analyser deux images simultanément pour un seul item plutôt qu'une seule image pour un item. Dans un deuxième temps, les temps de réponse sont plus élevés pour les items des amorces neutres que ceux des amorces incongruentes. Il est possible que le choix de la taille des items ait créé de la confusion chez les participants. Pour les amorces neutres, ils devaient comparer un item dans l'atmosphère (avion et aigle) avec un item dans l'espace (Lune et Soleil) alors qu'ils devaient comparer deux items, soit dans l'atmosphère (aigle et avion) ou soit dans l'espace (Lune et Soleil) pour les items des amorces incongruentes. Tout cela considéré, la nature des items ainsi que la présence de deux images simultanément semble avoir influencé les temps de réponse pour la tâche cognitive 3 (F↓C↑).

Dans un troisième temps, des effets d'interférence selon le type d'amorce ont pu être observés. Pour les performances, un effet d'interférence significatif a pu être observé pour les conditions expérimentales 1 (F↓C↓), 3 (F↓C↑) et 4 (F↑C↑). En effet, le type d'amorce a eu un effet sur les performances des participants puisque les performances des amorces incongruentes étaient significativement inférieures à celles des amorces congruentes. Cet effet n'a pas pu être observé pour la condition expérimentale 2 (F↑C↓). Comme discuté plus haut, cela peut s'expliquer par la nature des images utilisées par les amorces neutres. Pour les temps de réponse, les effets d'interférence ont été observés pour les conditions expérimentales 1 (F↓C↓), 2 (F↑C↓) et 4 (F↑C↑). Pour les conditions expérimentales 1 (F↓C↓) et 4 (F↑C↑), le type d'amorce a influencé les temps de réponse. En effet, les temps de réponse des amorces incongruentes étaient supérieurs à ceux des amorces congruentes. Cependant, on remarque que cet effet d'interférence est inverse pour la condition expérimentale 2 (F↑C↓). Cela indique donc que les temps de réponse étaient significativement plus élevés pour les amorces neutres que pour les amorces incongruentes. Ce résultat appuie l'interprétation que les items des amorces neutres dans cette condition semblent donc avoir réellement créé une confusion en raison de leur nature. Il n'a pas été possible d'observer un effet d'interférence pour la condition expérimentale 3 (F↓C↑). Comme les items de cette tâche étaient très différents de ceux des autres tâches et que deux images devaient être simultanément analysées, il est possible qu'un effet d'interférence, seulement en raison du type d'amorce, n'ait pu être observé.

5.2 La discussion sur les cibles

Dans les quatre tâches cognitives, les cibles congruentes suivent une amorce neutre où aucune conception intuitive n'est en jeu ou une amorce incongruente où la conception intuitive ne mène pas à une bonne réponse. Les résultats montrent que le type d'amorce, neutre ou incongruente, qui précède les cibles congruentes a un effet sur les performances et sur les temps de réponse pour certaines conditions

expérimentales. Lorsque cet effet est significatif, il est alors possible d'observer un effet d'amorçage négatif.

Pour les performances, les résultats montrent que les performances des cibles suivant une amorce neutre sont supérieures aux performances des cibles suivant une amorce incongruente pour les conditions expérimentales 3 (F↓C↑) et 4 (F↑C↑). Il était attendu que les performances des cibles suivant une amorce neutre soient supérieures aux cibles suivant une amorce incongruente pour toutes les conditions expérimentales. En effet, les participants ont dû mobiliser le contrôle inhibiteur afin de bloquer l'utilisation d'une conception intuitive pour les amorces incongruentes. Ensuite, ils ont dû immédiatement activer cette même conception intuitive pour la cible congruente. Il y a donc une plus grande possibilité d'erreurs lorsqu'un participant doit d'abord inhiber puis subséquemment activer une même conception intuitive. Ainsi, les performances sont moins élevées lorsque les participants inhibent d'abord une conception intuitive puis qu'ils la mobilisent subséquemment pour un item suivant (Borst, Moutier, et Houdé, 2013; Tipper, 2001; Brault Foisy *et al.*, 2021; Roell *et al.*, 2019). Les résultats pour ces deux conditions expérimentales, 3 (F↓C↑) et 4 (F↑C↑), sont donc cohérents avec ceux obtenus de ces études. De plus, les conditions expérimentales 3 (F↓C↑) et 4 (F↑C↑) sont les deux conditions qui possèdent un haut niveau de complexité. Ainsi, le type d'amorce précédant les cibles congruentes influence le taux de bonnes réponses lorsqu'un concept scientifique complexe est en jeu. Pour les conditions expérimentales 1 (F↓C↓) et 2 (F↑C↓), les résultats sont différents de ce qui était attendu. Les performances des cibles, de l'ordre de 96 % et de 97 %, sont très élevées. Le taux de réussite est donc près de 100 % pour ces deux conditions expérimentales. Il est donc difficile de détecter des différences statistiquement significatives. Ces deux conditions correspondent à un niveau faible de complexité. Lorsque le concept scientifique n'est pas complexe, il semblerait que le type d'amorce précédant les cibles n'aurait pas d'effet sur leur performance. Concernant l'effet du type d'amorce qui précède les cibles congruentes selon les niveaux des deux variables didactiques, les résultats de l'ANOVA à mesures répétées montrent qu'il y a uniquement une interaction double entre le type d'amorce et la variable didactique *complexité*. Ainsi, les résultats concordent avec ceux des études antérieures (Brault Foisy *et al.*, 2021) uniquement lorsque le niveau de complexité est élevé.

Pour les temps de réponse, les résultats indiquent que les temps des cibles suivant une amorce incongruente sont plus élevés que ceux suivant une amorce neutre pour les conditions expérimentales 2 (F↑C↓), 3 (F↓C↑) et 4 (F↑C↑). Pour ces trois conditions, les résultats sont donc conformes à ce qui était

attendu. En effet, du temps est nécessaire lorsque des réseaux de neurones associés à la conception intuitive sont d'abord inhibés pour un premier item et ensuite activés pour un deuxième item (Masson et Borst, 2018; Masson 2020). De plus, les résultats de l'étude de Brault Foisy et ses collaborateurs (2021) indiquent également que les temps de réponse des cibles suivant une amorce incongruente sont supérieurs à ceux suivant une amorce neutre. Pour la première condition expérimentale 1 (F↓C↓), ce n'est pas ce qui est arrivé. Comme les niveaux de familiarité de la conception intuitive et de la complexité du concept scientifique correspondant sont faibles, il est possible que les adolescents ne devaient pas mobiliser le contrôle inhibiteur. Ainsi, il n'était pas possible de détecter des différences statistiquement significatives. L'autre explication possible concerne la nature des items. Cette condition expérimentale correspond à la tâche sur le magnétisme. La conception intuitive est que tous les métaux sont attirés par un aimant et le concept scientifique est que seuls certains métaux sont attirés par un aimant. La question demandée aux participants est la suivante : est-ce attiré par l'aimant? Les items des amorces neutres sont un arc-en-ciel, du feu et un gros aimant (Annexe A). Les items des amorces incongruentes sont une bague en or et une assiette en aluminium (Annexe A). Les items des cibles sont une paille en plastique, un trombone de fer, une cuillère en fer ainsi qu'un bâton de popsicle en bois (Annexe A). Les items des amorces neutres sont donc différents de ceux des amorces incongruentes et des cibles congruentes. Il est donc possible que la nature des items ait demandé un traitement cognitif différent. De plus, la nature des items neutres peut avoir engendré un sentiment de confusion et de surprise chez les participants, se reflétant ainsi dans les temps de réponses en cible.

Toujours concernant les temps de réponse, les résultats de l'ANOVA à mesures répétées montrent que le type d'amorce qui précède la cible congruente a une influence uniquement significative pour la condition expérimentale 4 (F↑C↑). Ainsi, les temps de réponse pour les cibles qui suivent une amorce incongruente seraient uniquement plus élevés lorsque les niveaux de familiarité et de complexité sont élevés. Un effet d'amorçage négatif peut être observé lorsque les temps de réponse des cibles suivant une amorce incongruente sont supérieurs aux cibles suivant une amorce neutre. Ainsi, les résultats de ce projet de recherche indiquent que la mobilisation du contrôle inhibiteur a pu être uniquement observée pour la condition expérimentale 4 (F↑C↑). Concernant les autres conditions, rappelons que les analyses précédentes montrent que les résultats de certaines conditions étaient différents de ceux attendus, ce qui a pu nuire à l'observation d'un effet d'amorçage négatif. Pour la condition expérimentale 1 (F↓C↓), aucune différence statistiquement significative n'a été détectée, possiblement parce qu'il n'y avait pas de besoin d'inhibition pour cette tâche dont les niveaux des deux variables didactiques sont faibles. Conséquemment,

il n'est donc pas possible d'observer un effet d'amorçage négatif pour cette condition. Pour les conditions expérimentales 2 (F↑C↓) et 3 (F↓C↑), les temps de réponse des amorces neutres sont supérieurs à ceux des amorces incongruentes. Encore une fois, cela a comme conséquence de nuire à l'observation d'un effet d'amorçage négatif par la suite. Une autre interprétation est qu'il est possible que les tâches ne demandaient pas de mobiliser le contrôle inhibiteur, du moins pour les adolescents. En effet, il est important de rappeler qu'un des critères dans le choix des conceptions intuitives et de leur concept scientifique correspondant est que des enfants devaient avoir reçu un enseignement formel du concept scientifique. Ainsi, il est possible que les adolescents n'aient pas besoin de mobiliser le contrôle inhibiteur pour certaines conceptions intuitives choisies. Une dernière hypothèse serait que le besoin d'inhibition soit très faible en raison des niveaux de complexité faible ou de familiarité faible. Les tâches demandées aux participants étaient peut-être trop faciles, ce qui a donc demandé une très faible mobilisation du contrôle inhibiteur étant alors indétectable. Par conséquent, il est possible d'affirmer que la mobilisation du contrôle inhibiteur est présente pour la condition expérimentale 4 (F↑C↑), mais pas pour les autres conditions. En effet, cet effet d'amorçage négatif observé pour la condition 4 provient de la différence au niveau des temps de réponse entre les cibles suivant une amorce incongruente et les cibles suivant une amorce neutre. Comme les cibles sont congruentes dans les deux cas, l'effet peut uniquement provenir de l'amorce qui provoque un effet d'interférence lorsqu'elle fait appel à une conception intuitive qui ne mène pas à une bonne réponse (Brault Foisy *et al.*, 2021).

Pour résumer, les résultats montrent que le type d'amorce précédant les cibles congruentes engendre un effet d'amorçage négatif uniquement pour la condition où les niveaux de familiarité et de complexité sont élevés (F↑C↑). Cet effet confirme que les temps de réponse sont plus élevés pour les cibles suivant une amorce incongruente, la condition expérimentale dans laquelle le contrôle inhibiteur a dû être mobilisé lors du traitement des amorces (Ahr, Houdé et Borst, 2016; Babai *et al.*, 2012; Borst *et al.*, 2014; Borst *et al.*, 2013; Brault Foisy *et al.*, 2017; Lubin *et al.*, 2013; Roell *et al.*, 2019).

5.3 Le retour sur la question de recherche et sur les hypothèses

Les résultats de ce projet de recherche convergent en partie avec ceux qui ont été présentés dans la littérature scientifique en mettant en évidence que le contrôle inhibiteur est requis dans l'apprentissage des sciences (Allaire-Duquette *et al.*, 2019; Brault Foisy *et al.*, 2015; Masson *et al.*, 2014; Potvin *et al.*, 2020; Shtulman et Valcarcel, 2012). En effet, les résultats permettent d'observer que le contenu d'une tâche aurait une influence sur la mobilisation du contrôle inhibiteur, ce que la littérature scientifique semble

avoir proposé (Aïte *et al.*, 2019; Shtulman et Valcarcel, 2012). Il est donc possible de répondre à la question de ce projet de recherche : *est-ce que la familiarité des conceptions intuitives et la complexité de leur concept scientifique correspondant influencent le niveau de contrôle inhibiteur requis pour répondre à des questions portant sur des concepts scientifiques associés à des conceptions intuitives fréquentes au secondaire?*

Au terme des analyses des amorces et des cibles, il est possible d'observer l'effet des deux variables didactiques, la *familiarité* et la *complexité*, sur la mobilisation du contrôle inhibiteur dans l'apprentissage des sciences au secondaire.

La première variable didactique *familiarité* concerne la présence de conceptions intuitives chez les élèves. Un bon nombre de ces conceptions seraient erronées et tenaces, nuisant ainsi à l'apprentissage des élèves (Brault Foisy *et al.*, 2021; Potvin *et al.*, 2015). L'étude de Brault Foisy et ses collaborateurs (2015) indique que la ténacité de ces conceptions proviendrait, notamment, de la familiarité de ces dernières. Afin de contribuer à ces résultats, ce projet a permis d'observer les performances ainsi que les temps de réponse dans des tâches cognitives construites sous le paradigme d'amorçage négatif selon deux niveaux de familiarité. Les résultats montrent que le niveau de familiarité, faible ou élevé, peut parfois influencer les performances et les temps de réponse des amorces et des cibles. Cependant, il n'est pas possible d'affirmer que la familiarité de la conception intuitive influence la mobilisation du contrôle inhibiteur. En effet, un effet d'amorçage négatif a uniquement été observé pour la condition expérimentale 4 où les niveaux de familiarité et de complexité sont élevés. Ainsi, l'hypothèse émise pour la familiarité (plus le niveau de familiarité de la conception intuitive est élevé, plus il serait exigeant de résister à l'utilisation de cette conception intuitive) n'a pu être vérifiée. Une première hypothèse permettant d'expliquer ce résultat est qu'il est possible que la familiarité d'une conception intuitive n'ait pas autant d'impact de la complexité d'un concept scientifique sur la mobilisation du contrôle inhibiteur. Ainsi, si la familiarité a peu d'impact sur les temps de réponse, il n'est alors pas possible d'observer un effet d'amorçage négatif. Une autre hypothèse concerne la puissance statistique de l'échantillon final. Les ANOVAs se sont réalisées avec un échantillon final de 44 participants. Ce nombre n'est peut-être pas suffisant pour dégager les effets de la familiarité de la conception intuitive sur la mobilisation du contrôle inhibiteur. Avec un nombre plus élevé de participants, il aurait peut-être été possible d'observer un effet de la familiarité sur l'amorçage négatif. Une autre hypothèse est qu'il est possible que la familiarité d'une conception intuitive n'ait pas

d'effet sur la mobilisation du contrôle inhibiteur chez les adolescents. Ainsi, ce qui influencerait davantage les résultats chez les adolescents ne serait donc que la complexité du concept scientifique.

La deuxième variable didactique *complexité* concerne la complexité des concepts scientifiques. La littérature scientifique indique que plusieurs éléments peuvent contribuer à différents niveaux de complexité (Gulucar et Fyeweever, 2010; Lemmer *et al.*, 2021; Ozdemi, 2010; Toczowski et al., 2015). De plus, les études d'Allaire-Duquette et ses collaborateurs (2019) ainsi que celle de Brault Foisy et ses collaborateurs (2021) ont montré que le contrôle inhibiteur serait le mécanisme permettant aux élèves de délaissier les conceptions intuitives au profit des concepts scientifiques complexes. Au terme de ces analyses, il est possible d'affirmer que la complexité des concepts scientifiques a une influence sur la mobilisation du contrôle inhibiteur. Une interaction entre le type d'amorce et cette variable est observée pour les performances des amorces ($F(1,43) = 30,484$; $p < ,001$; $\eta_p^2 = 0,415$), pour les temps de réponse, des amorces ($F(1,43) = 97,688$; $p < ,001$; $\eta_p^2 = 0,694$), pour les performances des cibles ($F(1,43) = 4,136$; $p = 0,048$; $\eta_p^2 = 0,088$) ainsi que pour les temps de réponse des cibles ($F(1,43) = 5,905$; $p = 0,019$; $\eta_p^2 = 0,121$). De plus, l'interaction double pour les temps de réponse en cible permet d'observer l'influence de cette variable didactique sur la mobilisation du contrôle inhibiteur. Il semble donc que la complexité d'un concept scientifique influence la mobilisation de cette fonction exécutive. Ces résultats confirment alors l'hypothèse que plus un concept scientifique est complexe, plus le degré de mobilisation du contrôle inhibiteur est élevé. Dans le chapitre 2 de ce projet de recherche, les indicateurs permettant de classer les concepts scientifiques selon leur degré de complexité ont été présentés. Ces indicateurs sont le niveau d'abstraction, la charge cognitive, la complexité sémantique et la complexité contextuelle. Ainsi, la mobilisation du contrôle inhibiteur serait essentielle lors d'apprentissages de concepts scientifiques pouvant avoir un degré élevé d'un ou de plusieurs de ces indicateurs. Il est donc primordial de porter une attention particulière aux stratégies utilisées par les enseignants lorsque les concepts scientifiques semblent présenter de hauts niveaux d'un ou de plusieurs de ces indicateurs. Ces stratégies seront détaillées dans la prochaine section.

5.4 Les retombées des résultats sur l'avancement des connaissances et sur l'enseignement des sciences au secondaire et d'autres domaines

En premier lieu, les résultats de ce projet de recherche permettent d'apporter de nouvelles connaissances à celles des études réalisées sur les conceptions intuitives ainsi que sur le rôle du contrôle inhibiteur dans l'apprentissage des sciences. Ils confirment que la mobilisation du contrôle inhibiteur est importante pour

l'apprentissage de concepts scientifiques (Allaire-Duquette *et al.*, 2019; Brault Foisy *et al.*, 2015; Masson *et al.*, 2014; Potvin *et al.*, 2020; Shtulman et Valcarcel, 2012). Les résultats permettent également de montrer que le contenu d'une tâche influence la mobilisation du contrôle inhibiteur (Aïte *et al.*, 2019; Shtulman et Valcarcel, 2012). Jusqu'à récemment, aucune étude a observé l'influence du contenu dans des tâches cognitives impliquant la mobilisation du contrôle inhibiteur. Ce projet de recherche est donc le premier à présenter l'effet de deux variables didactiques, la *familiarité* et la *complexité*, sur la mobilisation du contrôle inhibiteur. Les résultats de ce projet de recherche permettent d'affirmer que la complexité d'un concept scientifique influence la mobilisation du contrôle inhibiteur. Cependant, il n'a pas été possible de confirmer l'influence de la familiarité d'une conception intuitive sur la mobilisation du contrôle inhibiteur. D'éventuels projets de recherche portant sur cette variable didactique pourraient possiblement confirmer son effet.

En deuxième lieu, les résultats mènent à certaines réflexions didactiques concernant l'enseignement des sciences au secondaire. En effet, les résultats montrent que la mobilisation du contrôle inhibiteur est importante lorsque les concepts scientifiques sont complexes. Un premier point de départ serait donc de se questionner sur le niveau de complexité des différents concepts scientifiques du cursus scolaire. Pour ce faire, il est possible de les évaluer en utilisant les différents indicateurs présentés dans le cadre théorique. Ces indicateurs sont le niveau d'abstraction (Malenfant-Robichaud, 2018 ; Thümay, 2016), la charge cognitive (Harle et Towns, 2011; Levy Nhahum *et al.*, 2010; Ohlsson, 2009), la complexité sémantique (Jasien, 2011) et la complexité contextuelle (Gulucar et Funewever, 2010; Kesidou et Duit, 1993). Lors de la préparation des situations d'apprentissage et d'évaluation, les enseignants devraient donc tenter d'évaluer le niveau de complexité du concept scientifique visé. Par le fait même, il serait important de se questionner sur la présence ou non de conceptions intuitives associées aux concepts scientifiques. Bien que les résultats ne permettent pas d'affirmer que la familiarité des conceptions intuitives influence le niveau de contrôle inhibiteur, certains effets d'interférence ont tout de même été observés. Ainsi, il serait sans doute souhaitable de se questionner également sur le niveau de familiarité des conceptions intuitives associé aux différents concepts scientifiques. Pour ce faire, les enseignants peuvent se référer à différents ouvrages et études qui concernent les conceptions intuitives (Babai et Amsterdamer, 2008; Brault Foisy *et al.*, 2015; Brault Foisy *et al.*, 2021; Lafortune *et al.*, 2013; Potvin *et al.*, 2015; Thouin, 2001; Thouin, 2015). Ils peuvent également se servir des différents indicateurs, nommés dans le cadre théorique, afin d'évaluer le niveau de familiarité. Ces indicateurs sont la prévalence socioculturelle (Arroio, 2010; Bernett *et al.*, 2006; Carlson *et al.*, 2020), la quotidienneté (Hermann et Lewis,

2003; Shtulman, 2021; Vosniadou et Skopeliti, 2014), la familiarité sémantique (Erickson, 1979; Kesidou et Duit, 1993), l'intuition (Amsterdamer, 2008; Babai *et al.*, 2010; Thompson-Schill, 2009; Thümay, 2016) et l'utilité (MELS, 2011).

En troisième lieu, il serait essentiel de se questionner sur les stratégies pédagogiques qui pourraient être mises en place par les enseignants afin de tenter de réduire l'amplitude du besoin du contrôle inhibiteur lors d'apprentissages de concepts scientifiques, en particulier s'ils sont complexes. Globalement, ces stratégies visent à éviter l'utilisation de conceptions intuitives et à faciliter, pour un moment seulement, l'usage des concepts scientifiques complexes. À titre d'exemple, il serait peut-être important de respecter une certaine séquence d'enseignement lors de l'enseignement d'un concept scientifique lié à une conception intuitive. Cette séquence consiste à d'abord expliquer le concept scientifique et d'ensuite présenter la conception intuitive qui lui est associée. En effet, certaines études suggèrent qu'il serait plus efficace d'expliquer un concept à des élèves avant de les confronter avec de fausses informations (Fugelsang et Dunbar, 2005; Ganea *et al.*, 2020; Nenciovici *et al.*, 2018). Par exemple, Potvin et ses collègues (2015) ont vérifié l'effet de l'ordre de présentation (*Confronter-Expliquer vs Expliquer-Confronter*) dans une étude portant sur la flottabilité de différentes balles. Dans cette étude, la conception intuitive touchée est que « les objets lourds coulent davantage ». Des items présentant deux balles ont été présentés aux participants. Les balles pouvaient varier selon la taille (petite, moyenne et grosse) et selon le matériel utilisé (polystyrène, bois et plomb). Les bonnes réponses étaient déterminées par le matériau et la taille des balles était le distracteur. Les participants devaient alors dire quelle balle coulerait davantage si elle était immergée dans l'eau. Les résultats de cette étude montrent que les participants étaient davantage performants après la séquence (*Expliquer-Confronter*) qu'après la séquence (*Confronter-Expliquer*). Les résultats de ces études suggèrent donc qu'il serait essentiel de d'abord expliquer les concepts scientifiques aux élèves. Par la suite, la conception intuitive associée à ce concept peut être présentée aux élèves. Les éléments qui font que cette conception intuitive ne mène pas à une bonne réponse peuvent être présentés aux élèves.

En plus d'être essentiel dans l'apprentissage des sciences au secondaire, le cadre théorique montre que le contrôle inhibiteur serait essentiel dans d'autres domaines tels que les langues (Lanoë *et al.*, 2016) et les mathématiques (Houdé *et al.*, 2011; Lubin *et al.*, 2013). Ainsi, les enseignants de ces domaines devraient également évaluer les niveaux de complexité des concepts qu'ils désirent enseigner. Pour ce faire il serait également possible d'utiliser, encore une fois, les indicateurs proposés par le cadre théorique.

5.5 Les limites du projet de recherche et les pistes pour des projets futurs

Les résultats de ce projet de recherche ont permis de vérifier l'influence de deux variables didactiques, la familiarité des conceptions intuitives et la complexité des concepts scientifiques sur la mobilisation du contrôle inhibiteur. Les résultats montrent qu'un niveau de complexité élevé pour un concept scientifique exige de mobiliser davantage le contrôle inhibiteur qu'un niveau de complexité faible. Cependant, les résultats n'ont pas permis d'affirmer que la variable didactique *familiarité* influence sa mobilisation. Il est donc possible, du moins pour le groupe de participants retenu pour cette étude et pour les contenus choisis dans les tâches, que la familiarité n'ait pas d'influence sur le niveau de mobilisation du contrôle inhibiteur. Il est possible également que la puissance statistique n'ait pas été suffisante pour détecter l'influence, peut-être faible, de la familiarité. Dans le même ordre d'idées, il est possible que les adolescents ne devaient pas mobiliser le contrôle inhibiteur dans certaines tâches cognitives. Ainsi, il n'était pas possible de vérifier l'influence des deux variables didactiques sur la mobilisation du contrôle inhibiteur pour ces tâches cognitives. De plus, bien que les quatre tâches cognitives respectent le paradigme d'amorçage négatif, il a été difficile de réussir à les rendre équivalentes. Afin d'y arriver, différents choix d'items ont été faits. Ces choix ont peut-être nui à l'obtention de résultats statistiquement significatifs au sujet de la familiarité. Par exemple, pour la condition expérimentale 2 (F↑C↓), la nature des items neutres (onde électromagnétique et résultat d'une combustion) était différente de celle des items incongruents et congruents (états solide ou liquide). Cette différence a pu engendrer des sentiments de confusion et de surprise chez les participants se reflétant au niveau des temps de réponse. La tâche de la condition expérimentale 3 (F↓C↑) demandait également de traiter deux images simultanément, alors que les autres tâches nécessitaient le traitement d'une seule image. Ainsi, le traitement de ces items neutres a demandé davantage de temps, ce qui a influencé les résultats. En effet, il est important de rappeler que la logique du paradigme d'amorçage négatif. Il est possible d'inférer la mobilisation du contrôle inhibiteur en comparant les temps de réponse des cibles suivant une amorce incongruente et les temps de réponse des cibles suivant une amorce neutre. Puisque la mobilisation du contrôle inhibiteur demande du temps, les temps de réponse des cibles suivant une amorce incongruente devraient être supérieurs à ceux des cibles suivant une amorce neutre (Borst *et al.*, 2015; Ahr *et al.*, 2016; Lanoë *et al.*, 2016; Potvin *et al.*, 2017; Brault Foisy *et al.*, 2021). Il est donc possible de vérifier si la différence entre ces temps de réponse est significative ou non. Cependant, si les items neutres ont demandé un temps de réponse plus élevé que prévu, il est alors difficile d'interpréter les différences de temps de réponse des cibles des essais test et des essais contrôle.

Une autre limite de ce projet de recherche est l'environnement dans lequel la collecte de données s'est réalisée. Les données ont été collectées dans sept classes d'une école secondaire, comprenant parfois jusqu'à 32 élèves. Plusieurs sources de distractions étaient présentes. Dans un premier temps, les participants étaient assis à des tables avec un autre participant. Ainsi, il est possible que certains participants aient été distraits par les autres participants autour d'eux. D'ailleurs, certains participants semblaient faire une course et certains participants ont eu beaucoup de fou rire. Ces distractions ont sans doute engendré beaucoup de variances dans les données, ce qui rend les différences plus difficiles à détecter au niveau statistique. Dans un deuxième temps, certains participants sont arrivés en retard ou ont sorti de la classe. Cela a encore une fois pu distraire les autres participants et ainsi influencer leurs temps de réponse.

Une limite supplémentaire est qu'une seule tâche cognitive a été construite pour chaque condition expérimentale. Ainsi, chaque niveau de familiarité et de complexité était relié à une seule conception intuitive avec son concept scientifique correspondant. Il est donc possible que des effets minimes pour ces paires de conceptions n'aient pu être détectés, alors que d'autres paires de conceptions auraient engendré des effets davantage détectables. De surcroît, il est aussi possible que les différences observées soient liées à autre chose que les niveaux de familiarité et de complexité.

En raison de ces limites, il est donc difficile de généraliser ces résultats. Somme toute, il serait intéressant que de futurs projets tentent de vérifier à nouveau les effets de la familiarité d'une conception intuitive et de la complexité d'un concept scientifique sur la mobilisation du contrôle inhibiteur avec d'autres tâches et d'autres contextes de collecte des données.

CONCLUSION

Comme discuté dans le chapitre portant sur la problématique, la littérature scientifique montre que l'apprentissage des sciences au secondaire est difficile (TIMSS, 2019). Plusieurs variables semblent contribuer à ces difficultés. Certaines de ces variables sont de nature individuelle, comme l'intérêt des élèves pour la science (Linnenbrink-Garcia *et al.*, 2011), le sentiment d'autoefficacité (Cordova *et al.*, 2014) ou l'attitude envers les sciences (Broughton *et al.*, 2013). Par ailleurs, la littérature scientifique montre que certaines variables sont directement liées au contenu. Une première variable est la présence de conceptions intuitives chez les élèves (Brault Foisy *et al.*, 2021; Potvin *et al.*, 2015) et une autre variable liée directement au contenu est la complexité de leur concept scientifique correspondant (Thümay, 2016, Toczowski *et al.*, 2015). Une étude de Brault Foisy et ses collaborateurs (2015) a indiqué que les conceptions intuitives sont encore présentes chez les experts (Allaire-Duquette *et al.*, 2021; Masson *et al.*, 2014; Potvin *et al.*, 2020 et Potvin et Cyr, 2017) et qu'elles seraient possiblement persistantes en raison de leur familiarité. Durant les dernières années, les études ont montré que le contrôle inhibiteur serait un mécanisme important afin de résister à ces conceptions intuitives et de mobiliser le bon concept scientifique (Allaire-Duquette *et al.*, 2018; 2019). Sa mobilisation pourrait également varier selon différents facteurs tel que l'âge (Ahr *et al.*, 2016; Borst *et al.*, 2015; Lanoë *et al.*, 2016; Lubin *et al.*, 2013) ainsi que par la nature du contenu (Brault-Foisy *et al.*, 2021; Shtulman et Valcarcel, 2012). Ces deux variables didactiques, la familiarité et la complexité, ont été mentionnées dans la littérature scientifique, mais leur influence sur la mobilisation du contrôle inhibiteur n'a jamais été observée.

L'objectif principal de ce projet de recherche était d'observer l'influence de la *familiarité* des conceptions intuitives ainsi que de la *complexité* de leur concept scientifique correspondant sur la mobilisation du contrôle inhibiteur dans des apprentissages en science au secondaire. Les hypothèses émises au départ étaient que plus une conception intuitive est familière, plus la mobilisation du contrôle inhibiteur est importante. En outre, plus un concept scientifique est complexe, plus la mobilisation du contrôle inhibiteur est également importante. Afin de vérifier ces deux hypothèses, quatre tâches cognitives correspondant à des conditions expérimentales différentes ont été construites sous le paradigme d'amorçage négatif (Tipper, 1985). Selon la condition expérimentale, les quatre tâches cognitives possèdent des niveaux faibles ou élevés des deux variables didactiques. La première condition expérimentale possède un faible niveau de familiarité et un faible niveau de complexité (F↓C↓); la deuxième condition expérimentale possède un haut niveau de familiarité et un faible niveau de complexité (F↑C↓); la troisième condition

expérimentale possède un faible niveau de familiarité et un haut niveau de complexité (F↓C↑) et la quatrième condition expérimentale possède un haut niveau de familiarité et un haut niveau de complexité (F↑C↑). Les quatre tâches cognitives ont été construites afin d'être les plus équivalentes possibles. Ainsi, les participants ont répondu à une question par Oui/Non pour différents items neutres, incongruents et congruents. Dans la condition contrôle, l'amorce neutre ne faisait pas appel à une conception intuitive afin de répondre à la question et la cible congruente faisait appel à une conception intuitive qui mène à une bonne réponse. Dans la condition test, l'amorce incongruente a demandé aux participants de mobiliser le contrôle inhibiteur puisque l'utilisation d'une conception intuitive ne menait pas à une bonne réponse. La cible congruente faisait appel à une conception intuitive qui mène à une bonne réponse. Les performances et les temps de réponse ont donc permis d'étudier l'influence des niveaux de familiarité et de complexité sur la mobilisation du contrôle inhibiteur.

Les résultats montrent que les performances des amorces incongruents étaient inférieures à celles des amorces neutres pour les conditions expérimentales 1 (F↓C↓), 3 (F↓C↑) et 4 (F↑C↑). Ainsi, le type d'amorce a une influence significative sur les performances pour ces trois conditions expérimentales. De plus, les temps de réponse des amorces incongruents sont supérieurs à ceux des amorces neutres pour les conditions expérimentales 1 (F↓C↓) et 4 (F↑C↑). Les participants ont donc pris davantage de temps pour répondre à une question lorsque le contrôle inhibiteur devait être mobilisé, ce qui était attendu (Brault Foisy *et al.*, 2021; Roell *et al.*, 2019). Pour les cibles, les résultats montrent que les performances des cibles suivant une amorce incongruente étaient inférieures à celles suivant une amorce neutre pour les conditions expérimentales 3 (F↓C↑) et 4 (F↑C↑). Ainsi, les performances sont davantage mauvaises lorsque les participants inhibent d'abord une conception intuitive puis qu'ils la mobilisent subséquemment pour un item suivant (Borst, Moutier, et Houdé, 2013; Tipper, 2001; Brault Foisy *et al.*, 2021; Roell *et al.*, 2019). Pour les temps de réponse des cibles, les temps de réponse des cibles suivant une amorce incongruente sont plus élevés que ceux suivant une amorce neutre pour les conditions expérimentales 2 (F↑C↓), 3 (F↓C↑) et 4 (F↑C↑). Ces résultats étaient attendus puisque l'activation de réseaux de neurones associée à une conception intuitive serait plus difficile lorsque ce même réseau a préalablement été inhibé (Brault Foisy *et al.*, 2021).

En plus de ces résultats conformes aux hypothèses de recherche, certains résultats inattendus ont été obtenus. Par exemple, le type d'amorce n'a pas eu d'effet significatif sur les performances de la condition expérimentale 2 (F↑C↓). De plus, les temps de réponse des amorces incongruents n'étaient pas supérieurs

à ceux des amorces neutres pour les conditions expérimentales 2 (F↑C↓) et 3 (F↓C↑). Pour les cibles, les performances des cibles suivant une amorce incongruente n'étaient pas inférieures à celles des cibles suivant une amorce neutre pour les conditions expérimentales 1 (F↓C↓) et 2 (F↑C↓). De plus, les temps de réponse des cibles suivant une amorce incongruente n'étaient pas supérieurs à ceux des cibles suivant une amorce neutre pour la condition expérimentale 1 (F↓C↓).










Au terme de l'analyse des amorces et des cibles, il est possible de confirmer que la variable didactique *complexité* a un effet sur la mobilisation du contrôle inhibiteur. Ainsi, l'apprentissage d'un concept scientifique complexe demande un niveau plus important de mobilisation qu'un apprentissage d'un concept scientifique moins complexe. Ceci permet également d'affirmer que l'hypothèse concernant cette variable est exacte. Il n'est cependant pas possible d'affirmer que la variable didactique *familiarité* a un effet sur la mobilisation du contrôle inhibiteur. En effet, les différences entre les temps de réponse des cibles suivant une amorce incongruente et des cibles suivant une amorce neutre n'étaient pas significatives. Il est cependant difficile de conclure hors de tout doute que la familiarité n'a pas d'impact sur la mobilisation du contrôle inhibiteur en raison des limites de l'étude présentée dans la section 5.5. Il serait donc pertinent que de futures recherches observent l'effet de cette variable dans des tâches cognitives construites également sous le paradigme d'amorçage négatif.

En plus de confirmer que le contrôle inhibiteur est un mécanisme important dans l'apprentissage des sciences au secondaire, les résultats de ce projet de recherche montrent que le contenu d'une tâche peut influencer sa mobilisation. En effet, des effets sur les performances ainsi que sur les temps de réponse ont été observés pour différentes conditions expérimentales, et donc, selon différents niveaux de complexité d'un concept scientifique. Ces résultats montrent donc que les enseignants doivent se questionner sur les différents niveaux de complexité des concepts scientifiques. Comme il a été montré que la complexité d'un concept scientifique semble influencer la mobilisation du contrôle inhibiteur, les enseignants devraient également tenter d'utiliser des stratégies d'enseignement permettant de favoriser la mobilisation du contrôle inhibiteur, en particulier si les concepts à apprendre sont complexes. Une stratégie allant dans ce sens a d'ailleurs été présentée dans la discussion. Notamment, selon les résultats de l'étude de Potvin et ses collègues (2015), il serait préférable d'expliquer un concept scientifique aux élèves avant de les confronter avec de fausses informations (par exemple, des conceptions intuitives qui ne mènent pas à une bonne réponse). Une bonne séquence d'enseignement serait donc d'expliquer un











concept scientifique complexe et d'ensuite présenter aux élèves les conceptions intuitives qui lui sont associées.

Finalement, les résultats de ce projet permettent de proposer de nouveaux projets de recherche qui pourraient confirmer l'influence de la variable didactique *familiarité* comme il a été possible de le faire avec la complexité du concept scientifique correspondant. Pour ce faire, de nouvelles tâches construites sous le paradigme d'amorçage négatif pourraient être construites en utilisant d'autres conceptions intuitives ainsi que leur concept scientifique correspondant. Les futurs résultats pourraient alors permettre de classer plusieurs concepts scientifiques selon un niveau d'importance de mobilisation du contrôle inhibiteur lors de l'apprentissage de concepts scientifiques. Il serait même intéressant de vérifier les effets de certaines stratégies pédagogiques utilisées lors des apprentissages scientifiques au secondaire.

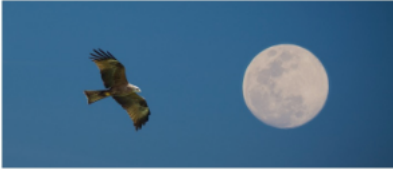
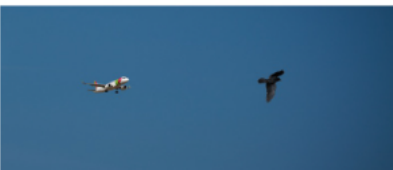




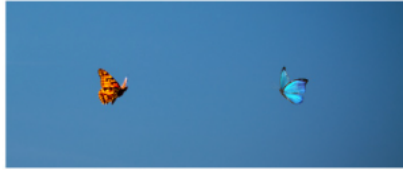

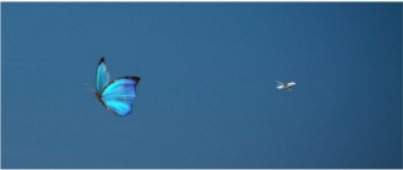

ANNEXE A
LES ITEMS DE LA CONDITION EXPERIMENTALE 1 (F↓C↓)

Items		
Neutres	Incongruents	Congruents
<p>Du feu</p> 	<p>Une bague en or</p> 	<p>Une paille en plastique</p> 
<p>Un arc-en-ciel</p> 	<p>Une assiette en aluminium</p> 	<p>Un trombone en fer</p> 
<p>Un gros aimant</p> 		<p>Une cuillère en fer</p> 
		<p>Un bâton de popsicle en bois</p> 




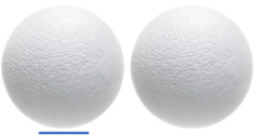

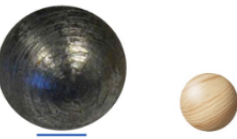
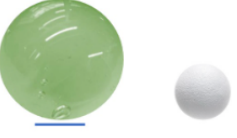
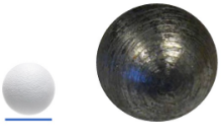


ANNEXE B
LES ITEMS DE LA CONDITION EXPÉRIMENTALE 2 (F↑C↓)

Items		
Neutres	Incongruents	Congruents
Un faisceau de lumière	Du miel	Du café
		
Une flamme	De la pâte à modeler	Du lait
		
	Du sable	Une roche
		
		Un morceau de bois
		
		Du jus d'orange
		

ANNEXE C
LES ITEMS DE LA CONDITION EXPÉRIMENTALE 3 (F↓C↑)

Items		
Neutres	Incongruents	Congruents
		
		
		
		
		
		

ANNEXE D
LES ITEMS DE LA CONDITION EXPÉRIMENTALE 4 (F↑C↑)

Items		
Neutres	Incongruents	Congruents
		
		
		
		
		
		

ANNEXE E

LE FORMULAIRE D'INFORMATION ET DE CONSENTEMENT DESTINÉ AUX PARENTS ET AUX ÉLÈVES



FORMULAIRE D'INFORMATION ET DE CONSENTEMENT DESTINÉ AUX PARENTS ET AUX ÉLÈVES

- Titre du projet de recherche :** Étude portant sur les concepts scientifiques difficiles et les erreurs fréquentes
- Chercheur responsable :** Lorie-Marlène Brault Foisy, Ph.D., Université du Québec à Montréal
- Membres de l'équipe :** Steve Masson, Ph. D., Université du Québec à Montréal
Patrice Potvin, Ph. D., Université du Québec à Montréal
Élisabeth Bélanger, candidate à la maîtrise, Université du Québec à Montréal
Karène Brindle, candidate à la maîtrise, Université du Québec à Montréal
Mélissane Blain, candidate à la maîtrise, Université du Québec à Montréal
- Coordonnatrice :** Élisabeth Bélanger, belanger.elisabeth@uqam.ca
- Organisme de financement :** Conseil de recherche en sciences humaines (CRSH)

Préambule

Nous invitons votre enfant à participer à un projet de recherche avec sa classe.

Avant d'accepter qu'il participe à ce projet et de signer ce formulaire, il est important de prendre le temps de lire et de bien comprendre les renseignements ci-dessous. S'il y a des mots ou des sections que vous ne comprenez pas ou qui ne semblent pas clairs, n'hésitez pas à nous à poser des questions ou à communiquer avec la coordonnatrice de recherche.

Objectifs du projet

L'Université du Québec à Montréal réalise présentement un projet de recherche, sous la direction de la professeure Lorie-Marlène Brault Foisy, qui a pour but d'étudier les processus cognitifs qui sous-tendent l'apprentissage de certains concepts scientifiques difficiles. Les résultats de cette étude sont susceptibles d'avoir des implications intéressantes pour l'enseignement des sciences.

Nature de la participation

Dans le cadre de ce projet, nous viendrons dans la classe de votre enfant à deux reprises durant l'hiver. Chacune des rencontres durera au maximum 60 minutes.

Avec votre accord, lors de ces deux rencontres, votre enfant sera invité à réaliser des « mini-jeux » présentés sur tablette électroniques (iPad) portant sur différents contenus en sciences. Ces jeux porteront sur des concepts scientifiques simples, connus de votre enfant et issus du programme scolaire officiel, mais qui, étonnamment, sont souvent très contre-intuitifs pour les enfants, et parfois même pour les adultes. Pendant que votre enfant complètera les « mini-jeux », la tablette enregistrera ses réponses ainsi que le temps qu'il met pour répondre à chacun des items.

Tout ceci sera bien évidemment organisé en collaboration avec l'enseignant(e) de votre enfant et sa participation est complètement volontaire.

Avantages

Les données recueillies nous permettront de mieux comprendre ce qui caractérise certaines erreurs fréquentes en sciences. Également, les résultats de cette étude sont susceptibles d'avoir des implications intéressantes pour l'enseignement des sciences.

Risques et inconvénients

Il n'y a pas de risque ou d'inconfort associé à la participation de votre enfant à cette recherche. Les activités qui lui seront proposées sont similaires à celles qu'il rencontre dans une journée de classe ordinaire. Néanmoins, soyez assuré que l'équipe de recherche demeurera attentive à toute manifestation d'inconfort chez votre enfant durant sa participation.

Matériel

Notre équipe de recherche fournira tous le matériel requis (documentation, iPads, etc.). En aucun cas, le CSSDM (ou tout autre Centre de services scolaire), ses établissements, son personnel ou ses élèves ne seront tenus responsables en cas de perte, de vol ou de bris de l'équipement prêté.

Compensation

Aucune rémunération ni compensation n'est offerte au terme de la participation de votre enfant. Sa classe recevra une carte-cadeau de 100 \$ pour l'achat de matériel pédagogique.

Confidentialité

Il est entendu que tous les renseignements recueillis auprès de votre enfant sont confidentiels et seront anonymisés. Seuls les membres de l'équipe de recherche y auront accès. Le présent formulaire de consentement sera conservé dans un classeur verrouillé à l'Université du Québec à Montréal pour la durée totale du projet et détruit après 5 ans. Les données numériques de votre enfant seront conservées sur l'ordinateur de la chercheuse principale qui est protégé par un mot de passe pour la durée totale du projet et détruites avec un logiciel spécialisé après 5 ans. Les données recueillies dans le cadre de ce projet de recherche pourraient être utilisées à des fins d'analyse et de publication, notamment dans des revues scientifiques. En aucun cas, il ne sera possible d'associer les données obtenues dans le cadre de ce projet au nom de votre enfant, ni à celui de son école ou de son enseignant(e).

Participation volontaire et droit de retrait

La participation de votre enfant à ce projet est volontaire. Cela signifie que même si vous consentez aujourd'hui à ce que votre enfant participe au projet, il demeure entièrement libre de ne pas participer ou de mettre fin à sa participation, en tout temps, sans justification, ni pénalité. Vous pouvez également retirer votre enfant du projet en tout temps. Dans ce cas, et à moins d'une directive verbale ou écrite contraire de votre part, les documents, renseignements et données le concernant seront détruits. Des activités pédagogiques régulières seront offertes en classe pour les enfants qui ne participent pas au projet de recherche.

Le responsable du projet peut mettre fin à sa participation, sans votre consentement, s'il estime que son bien-être ou celui des autres participants est compromis ou bien s'il ne respecte pas les consignes du projet.

Recherches ultérieures

Les données de recherche de votre enfant seront rendues anonymes et conservées pendant 5 ans au terme du projet. Elles pourraient être utilisées dans le cadre de d'autres projets de recherche similaires. Vous êtes libre de refuser cette utilisation secondaire.

Approbation du CIERH : 2022 - 4092

- J'accepte que ses données puissent être utilisées dans d'autres projets de recherche
 Je refuse que ses données puissent être utilisées dans d'autres projets de recherche

Responsabilité

En acceptant que votre enfant participe à ce projet, vous ne renoncez pas pour lui à aucun de ses droits, ni ne libérez les chercheurs et l'Université du Québec à Montréal de leurs obligations civiles et professionnelles.

Personnes-ressources :

Vous pouvez contacter la chercheuse responsable du projet, la professeure Lorie-Marlène Brault Foisy, au 514-987-3000 poste 1907 pour des questions additionnelles sur le projet. Vous pouvez également discuter avec la coordonnatrice du projet, Élisabeth Bélanger, des conditions dans lesquelles se déroule la participation de votre enfant en écrivant à l'adresse : belanger.elisabeth@uqam.ca.

Le Comité institutionnel d'éthique de la recherche avec des êtres humains (CIEREH) a approuvé ce projet et en assure le suivi. Pour toute information vous pouvez communiquer avec le coordonnateur du Comité au numéro (514) 987-3000 poste 7753 ou par courriel à l'adresse : cierreh@uqam.ca.

Pour toute question concernant ses droits en tant que participant à ce projet de recherche ou si vous avez des plaintes à formuler, vous pouvez communiquer avec la protectrice universitaire de l'UQAM par courriel: protectriceuniversitaire@uqam.ca ou par téléphone : (514) 987-3151.

Remerciements :

La collaboration de votre enfant est importante à la réalisation de notre projet et l'équipe de recherche tient à vous en remercier. Si vous souhaitez obtenir un résumé écrit des principaux résultats de cette recherche, veuillez ajouter vos coordonnées ci-dessous.

Je désire recevoir un résumé des résultats du projet : Oui Non

Si oui, veuillez ajouter vos coordonnées (courriel) : _____

Signature :

En tant que parent ou tuteur légal de _____, je reconnais avoir lu le présent formulaire d'information et de consentement. Je comprends les objectifs du projet et ce que la participation de mon enfant implique. Je confirme avoir disposé du temps nécessaire pour discuter avec mon enfant de la nature de son implication. Je reconnais avoir eu la possibilité de contacter le responsable du projet (ou son délégué) afin de poser toutes les questions concernant sa participation et que l'on m'a répondu de manière satisfaisante. Je comprends que sa participation à ce projet est volontaire et que je peux ou qu'il peut y mettre fin en tout temps, sans pénalité d'aucune forme, ni justification à donner. Je consens volontairement à ce que mon enfant participe à ce projet de recherche.

Signature du parent/tuteur légal : _____ Date : _____

Nom (lettres moulées) : _____

Assentiment écrit de l'élève :

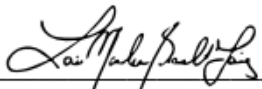
Moi, _____, j'accepte de participer à ce projet de recherche avec ma classe. Je comprends que ma participation est volontaire et qu'en tout temps, je suis libre d'y mettre fin. Je comprends ce que ma participation implique.

Signature de l'élève : _____ Date : _____

Approbation du CIEREH : 2022 - 4092

Déclaration du chercheur principal (ou de son délégué) :

Je, soussigné, déclare avoir expliqué les objectifs, la nature, les avantages, les risques du projet et autres dispositions du formulaire d'information et de consentement et avoir répondu au meilleur de ma connaissance aux questions posées.

Signature :  _____

Date : 17/10/2022

Nom (lettres moulées) : Lorie-Marlène Brault Foisy

Coordonnées : brault-foisy.lorie-marlene@uqam.ca

Un exemplaire de ce document signé doit être remis au représentant légal de l'enfant

ANNEXE F

LE FORMULAIRE D'INFORMATION ET DE CONSENTEMENT DESTINÉ AU PERSONNEL

ENSEIGNANT



FORMULAIRE D'INFORMATION ET DE CONSENTEMENT DESTINÉ AU PERSONNEL ENSEIGNANT

- Titre du projet de recherche :** Étude portant sur les concepts scientifiques difficiles et les erreurs fréquentes
- Chercheur responsable :** Lorie-Marlène Brault Foisy, Ph.D., Université du Québec à Montréal
- Membres de l'équipe :** Steve Masson, Ph. D., Université du Québec à Montréal
Patrice Potvin, Ph. D., Université du Québec à Montréal
Élisabeth Bélanger, candidate à la maîtrise, Université du Québec à Montréal
Karène Brindle, candidate à la maîtrise, Université du Québec à Montréal
Mélissane Blain, candidate à la maîtrise, Université du Québec à Montréal
- Coordonnatrice :** Élisabeth Bélanger, belanger.elisabeth@uqam.ca
- Organisme de financement :** Conseil de recherche en sciences humaines (CRSH)
-

Préambule

Nous vous invitons à participer à un projet de recherche avec votre classe.

Il est important de prendre le temps de lire et de bien comprendre les renseignements ci-dessous. S'il y a des mots ou des sections que vous ne comprenez pas ou qui ne semblent pas clairs, n'hésitez pas à nous à poser des questions ou à communiquer avec la coordonnatrice de recherche.

Objectifs du projet

L'Université du Québec à Montréal réalise présentement un projet de recherche, sous la direction de la professeure Lorie-Marlène Brault Foisy, qui a pour but d'étudier les processus cognitifs qui sous-tendent l'apprentissage de certains concepts scientifiques difficiles. Les résultats de cette étude sont susceptibles d'avoir des implications intéressantes pour l'enseignement des sciences au primaire et au secondaire.

Nature de la participation

Ce projet de recherche implique plus directement vos élèves puisque notre équipe de recherche souhaite recueillir des données auprès d'eux. Toutefois, votre participation est importante pour assurer le bon déroulement de nos visites en classe.

Si vous acceptez de participer, vous serez d'abord invité à distribuer une lettre d'information accompagnée d'un formulaire de consentement destinés à vos élèves et à leurs parents, puis à les récupérer lorsqu'ils seront complétés. Par la suite, notre projet implique deux rencontres en classe avec vos élèves. Ces rencontres seront fixées selon l'horaire qui vous convient le mieux durant l'hiver 2023. Lors de la première rencontre, nous présenterons plus concrètement notre projet aux élèves de votre classe et nous ferons une courte activité sur des tablettes électroniques (iPad) afin de s'assurer que tous les élèves en comprennent bien le fonctionnement. Cette rencontre durera au maximum 45 minutes. Lors de la deuxième rencontre, les élèves compléteront quatre tâches en sciences présentées sous forme de mini-jeux sur tablettes électroniques (iPad). Ces mini-jeux porteront sur des concepts scientifiques simples, connus des élèves et issus du programme scolaire officiel, mais qui, étonnamment, sont souvent contre-intuitifs pour les enfants et parfois même pour les adultes. Cette deuxième rencontre devrait durer environ 60 minutes. Durant ces

deux rencontres, votre implication consiste à nous assister avec la gestion de votre groupe afin que tout se déroule dans une ambiance agréable.

Avantages

Les données recueillies auprès des élèves nous permettront de mieux comprendre ce qui caractérise certaines erreurs fréquentes en sciences. Également, les résultats de cette étude sont susceptibles d'avoir des implications intéressantes pour l'enseignement des sciences.

Risques et inconvénients

Il n'y a pas de risque ou d'inconvénient associé à votre participation, ni à celle de votre classe. Les activités proposées seront entièrement organisées par l'équipe de recherche.

Matériel

Notre équipe de recherche fournira tous le matériel requis (documentation, iPads, etc.). En aucun cas, le CSSDM (ou tout autre Centre de services scolaire), ses établissements, son personnel ou ses élèves ne seront tenus responsables en cas de perte, de vol ou de bris de l'équipement prêté.

Compensation

Au terme de la participation de votre classe, vous recevrez une carte-cadeau de 100 \$ destinée à l'achat de matériel pédagogique.

Confidentialité

Il est entendu que tous les renseignements recueillis auprès de votre école, de vos élèves et de vous sont confidentiels et seront anonymisés. Seuls les membres de l'équipe de recherche y auront accès. Les formulaires de consentement de vos élèves et le vôtre seront conservés dans un classeur verrouillé à l'Université du Québec à Montréal pour la durée totale du projet et détruits après 5 ans. Les données numériques de vos élèves seront conservées sur l'ordinateur de la chercheuse principale qui est protégé par un mot de passe pour la durée totale du projet et détruites avec un logiciel spécialisé après 5 ans. Les données recueillies dans le cadre de ce projet de recherche pourraient être utilisées à des fins d'analyse et de publication, notamment dans des revues scientifiques. En aucun cas, il ne sera possible d'associer les données obtenues dans le cadre de ce projet au nom de votre école, à votre nom ou aux noms des élèves de votre classe.

Participation volontaire et droit de retrait

Votre participation à ce projet est volontaire. Cela signifie que même si vous consentez aujourd'hui à participer au projet, vous demeurez entièrement libre de mettre fin à votre participation, en tout temps, sans justification, ni pénalité. Il en va de même pour les élèves de votre classe. Dans ce cas, et à moins d'une directive verbale ou écrite contraire de votre part, les documents, renseignements et données vous concernant seront détruits. Si certains élèves de votre classe ne souhaitent pas participer au projet, vous pourrez leur fournir une occupation ou du travail, à votre convenance.

Responsabilité

En acceptant de participer à ce projet, vous ne renoncez pas à aucun de vos droits, ni ne libérez les chercheurs et l'Université du Québec à Montréal de leurs obligations civiles et professionnelles.

Personnes-ressources :

Vous pouvez contacter la chercheuse responsable du projet, la professeure Lorie-Marlène Brault Foisy, au 514-987-3000 poste 1907 pour des questions additionnelles sur le projet. Vous pouvez également discuter avec la coordonnatrice du projet, Élisabeth Bélanger, des conditions dans lesquelles se déroule la participation de votre enfant en écrivant à l'adresse : belanger.elisabeth@uqam.ca.

Le Comité institutionnel d'éthique de la recherche avec des êtres humains (CIEREH) a approuvé ce projet et en assure le suivi. Pour toute information vous pouvez communiquer avec le coordonnateur du Comité au numéro (514) 987-3000 poste 7753 ou par courriel à l'adresse : cierreh@uqam.ca.

Pour toute question concernant ses droits en tant que participant à ce projet de recherche ou si vous avez des plaintes à formuler, vous pouvez communiquer avec la protectrice universitaire de l'UQAM par courriel : protectriceuniversitaire@uqam.ca ou par téléphone : (514) 987-3151.

Remerciements :

Votre collaboration et celle de vos élèves est importante pour la réalisation de notre projet et l'équipe de recherche tient à vous en remercier. Si vous souhaitez obtenir un résumé écrit des principaux résultats de cette recherche, veuillez ajouter vos coordonnées ci-dessous.

Je désire recevoir un résumé des résultats du projet : Oui Non

Si oui, veuillez ajouter vos coordonnées (courriel) : _____

Signature(s) :


Je, _____, reconnais avoir lu le présent formulaire d'information et de consentement. Je comprends les objectifs du projet et ce ma participation implique. Je confirme avoir disposé du temps nécessaire réfléchir à ma participation. Je reconnais avoir eu la possibilité de contacter le responsable du projet (ou son délégué) afin de poser toutes les questions concernant ma participation et que l'on m'a répondu de manière satisfaisante. Je comprends que ma participation à ce projet est volontaire et que je peux y mettre fin en tout temps, sans pénalité d'aucune forme, ni justification à donner. Je consens volontairement à participer à ce projet de recherche.

Signature : _____ Date : _____

Nom (lettres moulées) : _____

Déclaration du chercheur principal (ou de son délégué) :

Je, soussigné, déclare avoir expliqué les objectifs, la nature, les avantages, les risques du projet et autres dispositions du formulaire d'information et de consentement et avoir répondu au meilleur de ma connaissance aux questions posées.

Signature :  _____

Date : 17/10/2022

Nom (lettres moulées) : Lorie-Marlène Brault Foisy

Coordonnées : brault-foisy.lorie-marlene@uqam.ca

ANNEXE G

LE FORMULAIRE D'INFORMATION ET DE CONSENTEMENT DESTINÉ AUX DIDACTICIENS



FORMULAIRE D'INFORMATION ET DE CONSENTEMENT

Titre du projet de recherche : Analyse exploratoire croisée des effets de deux variables didactiques sur la mobilisation du contrôle inhibiteur afin de résister à des conceptions intuitives en sciences

Chercheur responsable : Lorie-Marlène Brault Foisys, Ph.D., Université du Québec à Montréal

Membres de l'équipe : Steve Masson, Ph. D., Université du Québec à Montréal
Patrice Potvin, Ph. D., Université du Québec à Montréal
Élisabeth Bélanger, candidate à la maîtrise, Université du Québec à Montréal
Karène Brindle, candidate à la maîtrise, Université du Québec à Montréal

Coordonnatrice : Élisabeth Bélanger, belanger.elisabeth@uqam.ca

Organisme de financement : Conseil de recherche en sciences humaines (CRSH)

Préambule

Nous vous invitons à participer à un projet de recherche.

Avant d'accepter de participer à ce projet et de signer ce formulaire, il est important de prendre le temps de lire et de bien comprendre les renseignements ci-dessous. S'il y a des mots ou des sections que vous ne comprenez pas ou qui ne semblent pas clairs, n'hésitez pas à nous à poser des questions ou à communiquer avec le responsable du projet ou le coordonnateur de recherche.

Objectifs du projet

L'amélioration des pratiques professionnelles liées à l'enseignement des sciences est au cœur de ce projet qui s'ancre directement dans le contenu scolaire du curriculum de sciences en s'intéressant aux conceptions scientifiques difficiles à apprendre. L'objectif général de ce projet de recherche est de mieux comprendre le rôle des deux variables didactiques familiarité et complexité sur la mobilisation du contrôle inhibiteur dans l'apprentissage de concepts scientifiques auxquels sont associées des conceptions intuitives fréquentes. Plus précisément, ce projet vise à 1-concevoir et valider quatre tâches cognitives qui correspondent au croisement des deux niveaux (faible et élevé) des variables familiarité et complexité; et 2-mettre à l'épreuve les tâches auprès d'élèves du primaire, d'élèves du secondaire et d'étudiants universitaires afin de préciser et valider le modèle d'interaction de ces variables sur la mobilisation du contrôle inhibiteur.

Nature de la participation

Aux côtés d'une vingtaine de didacticien(ne)s des sciences, votre participation consistera à prendre part à un processus de prise de décision de groupe. Vous devrez classer une dizaine de paires de conceptions en leur attribuant un score de 1 à 6 pour chacune des 2 variables d'intérêt (familiarité et complexité) de notre recherche, selon un processus itératif en deux tours : au terme du premier tour, un sommaire anonymisé de l'évaluation réalisée par chacun des autres didacticien(ne)s sera communiqué à tous, vous permettant ainsi de réviser votre jugement antérieur, si vous le souhaitez. Ce processus permettra d'effectuer une sélection finale objective des 4 conceptions qui correspondent le mieux aux niveaux extrêmes (faible et élevé) des deux variables didactiques à l'étude. La participation à cette activité de prise de décision de groupe implique que vous vous engagiez à respecter la confidentialité des propos partagés par le groupe.

Ce processus aura lieu au moyen d'un questionnaire de type « GoogleForm » que vous pourrez remplir au moment qui vous convient le mieux. Le premier tour aura lieu durant le mois de **mars 2022** et le deuxième tour en **avril 2022**.

Avantages

Les données recueillies lors de ce processus de prise de décision nous permettront de concevoir 4 tâches cognitives que nous pourrions mettre à l'épreuve auprès de trois groupes d'âge : primaire, secondaire et universitaire. Au terme du projet de recherche, les données collectées nous permettront de valider le modèle d'interaction entre la familiarité et la complexité sur la mobilisation du contrôle inhibiteur dans le but de mieux comprendre ce qui caractérise certaines erreurs fréquentes en sciences. Les résultats de cette étude sont également susceptibles d'avoir des implications intéressantes pour l'enseignement des sciences.

Risques et inconvénients

En participant à cette recherche, vous ne courez pas de risques ou d'inconvénients particuliers.

Compensation

Aucune rémunération ni compensation n'est offerte au terme de votre participation.

Confidentialité

Il est entendu que tous les renseignements recueillis sont confidentiels. Seuls les membres de l'équipe de recherche y auront accès. Vos données de recherche ainsi que votre formulaire de consentement seront conservés séparément à l'Université du Québec à Montréal pour la durée totale du projet et détruites après 5 ans. Les données recueillies dans le cadre de votre participation seront utilisées afin de concevoir des tâches cognitives qui seront mises à l'épreuve auprès d'élèves du primaire, du secondaire et d'étudiants universitaires. Ces données pourraient être utilisées à des fins d'analyse ou de publication. En aucun cas, il ne sera possible d'associer vos données à votre nom.

Participation volontaire et droit de retrait

Votre participation à ce projet est volontaire. Cela signifie que vous acceptez de participer au projet sans aucune contrainte ou pression extérieure. Cela signifie également que vous êtes libre de mettre fin à votre participation en tout temps au cours de cette recherche, sans préjudice de quelque nature que ce soit, et sans avoir à vous justifier. Dans ce cas, et à moins d'une directive verbale ou écrite contraire de votre part, les documents, renseignements et données vous concernant seront détruits.

Le responsable du projet peut mettre fin à votre participation, sans votre consentement, s'il estime que votre bien-être ou celui des autres participants est compromis ou bien si vous ne respectez pas les consignes du projet.

Recherches ultérieures

Vos données de recherche seront rendues anonymes et conservées pour une durée de 5 ans au terme du projet. Nous souhaitons les utiliser dans d'autres projets de recherche similaires. Vous êtes libre de refuser cette utilisation secondaire.

- J'accepte que mes données puissent être utilisées dans d'autres projets de recherche
- Je refuse que mes données puissent être utilisées dans d'autres projets de recherche

Responsabilité

En acceptant de participer à ce projet, vous ne renoncez à aucun de vos droits ni ne libérez les chercheurs et l'Université du Québec à Montréal de leurs obligations civiles et professionnelles.

Personnes-ressources :

Vous pouvez contacter la chercheuse responsable du projet, la professeure Lorie-Marlène Brault Foisy, au 514-987-3000 poste 1907, pour des questions additionnelles sur le projet. Vous pouvez également discuter avec la coordonnatrice du projet, Élisabeth Bélanger, des conditions dans lesquelles se déroule votre participation en écrivant à l'adresse : belanger.elisabeth@uqam.ca.

Le Comité institutionnel d'éthique de la recherche avec des êtres humains (CIEREH) a approuvé ce projet et en assure le suivi. Pour toute information vous pouvez communiquer avec le coordonnateur du Comité au numéro (514) 987-3000 poste 7753 ou par courriel à l'adresse : cierreh@uqam.ca.

Pour toute question concernant vos droits en tant que participant à ce projet de recherche ou si vous avez des plaintes à formuler, vous pouvez communiquer avec la protectrice universitaire de l'UQAM par courriel : protectriceuniversitaire@uqam.ca ou par téléphone: (514) 987-3151.

Remerciements :

Votre collaboration est importante à la réalisation de notre projet et l'équipe de recherche tient à vous en remercier. Si vous souhaitez obtenir un résumé écrit des principaux résultats de cette recherche, veuillez ajouter vos coordonnées ci-dessous.

Je désire recevoir un résumé des résultats du projet : Oui Non

Consentement du participant :

Par la présente, je reconnais avoir lu le présent formulaire d'information et de consentement. Je comprends les objectifs du projet et ce que ma participation implique. Je confirme avoir disposé du temps nécessaire pour réfléchir à ma décision de participer. Je reconnais avoir eu la possibilité de contacter le responsable du projet (ou son délégué) afin de poser toutes les questions concernant ma participation et que l'on m'a répondu de manière satisfaisante. Je comprends que je peux me retirer du projet en tout temps, sans pénalité d'aucune forme, ni justification à donner. Je m'engage à respecter la confidentialité des propos partagés par les autres personnes lors du processus de prise de décision de groupe. Je consens volontairement à participer à ce projet de recherche.

Signature : _____ Date : _____

Nom (lettres moulées) et coordonnées : _____

Déclaration du chercheur principal (ou de son délégué) :

Je, soussigné, déclare avoir expliqué les objectifs, la nature, les avantages, les risques du projet et autres dispositions du formulaire d'information et de consentement et avoir répondu au meilleur de ma connaissance aux questions posées.

Signature :  _____ Date : **3 mars 2022** _____

Nom (lettres moulées) et coordonnées : **Lorie-Marlène Brault Foisy** _____

Un exemplaire de ce document signé doit être remis au participant

RÉFÉRENCES

- Ahr, E., Houdé, O. et Borst, G. (2016). Inhibition of the mirror generalization process in reading in school-aged children. *Journal of Experimental Child Psychology*, 145, 157–65.
- Aïte, A., Cassotti, M., Linzarini, A., Osmont, A., Houdé, O. et Borst, G. (2018). Adolescents' inhibitory control: keep it cool or lose control. *Developmental Science*, 21(1), e12491.
- Allaire-Duquette, G., Babai, R. et Stavy, R. (2018). Interventions aimed at overcoming intuitive interference: insights from brain-imaging and behavioral studies. *Cognitive Processing*, 20(1), 1-9.
- Allaire-Duquette, G., Masson, S., Bélanger, M., Grabner, R. H. et Koschutnig, K. (2019). Individual differences in science competence among students are associated with ventrolateral prefrontal cortex activation. *Journal of Neuroscience Research*, 97(9), 1163–1178.
- Allaire-Duquette, G., Brault Foisy, L. -M., Potvin, P., Riopel, M., Larose, M. et Masson, S. (2021). An fMRI study of scientists with a Ph.D in physics confronted with naive ideas in science. *Npj Science of Learning*, 6(1), 11.
- Anwyl-Irvine, A. L., Massonnié Jessica, Flitton, A., Kirkham, N. et Evershed, J. K. (2019). Gorilla in our midst: an online behavioral experiment builder. *Behavior Research Methods*, 52(1), 388–407.
- Arroio, A. (2010). Context based learning: a role for cinema in science education. *Science Education International*, 21(3), 131–143.
- Astolfi, J.-P., Darot, É., Ginsburger-Vogel, Y. et Toussaint, J. (2008). Didactique. Dans J.-P. Astolfi (dir), *Mots-clés de la didactique des sciences : repères, définitions, bibliographies (2^e éd., Ser, Pratiques pédagogiques)*. De Boeck.
- Auclair, A., Brault-Foisy, L.-M. et Masson, S. (2019). L'amorçage négatif : Une méthodologie permettant de détecter la présence du contrôle inhibiteur dans différents apprentissages. [Poster]. ResearchGate. https://www.researchgate.net/publication/341161795_L'amorçage_négatif_Une_méthodologie_permettant_de_détecter_la_présence_du_contrôle_inhibiteur_dans_différents_apprentissages
- Babai, R. et Amsterdamer, A. (2008). The persistence of solid and liquid naive conceptions: a reaction time study. *Journal of Science Education and Technology*, 17(6), 553-559.
- Babai, R., Sekal, R. et Stavy, R. (2010). Persistence of the intuitive conception of living things in adolescence. *Journal of Science Education and Technology*, 19(1), 20-26.
- Bernett, M., Wagner, H., Gatling, A., Anderson, J., Houle, M. et Kafka, A. (2006). The impact of fiction film on student understanding of science. *Journal of Science Education and Technology*, 15(2). 179-191.
- Bjorklund, D. F. et Harnishfeger, K. K. (1995). « The evolution of inhibition mechanisms and their role in human cognition and behavior », dans F. N. Dempster et C. J. Brainerd (dir.), *Interference and Inhibition in Cognition*, San Diego, CA, Academic Press, 141-173.

- Borst G., Ahr, E., Roell, M., et Houdé O. (2015). The cost of blocking the mirror generalization process in reading: evidence for the role of inhibitory control in discriminating letters with lateral mirror-image counterparts. *Psychonomic Bulletin & Review*, 22(1), 228–234.
- Brault Foisy, L.-M., Masson, S., Potvin, P. et Riopel, M. (2015). Is inhibition involved in overcoming a common physics misconception in mechanics?. *Trends in Neuroscience and Education*, 4(1-2), 26-36.
- Brault Foisy, L. -M., Ahr, E., Blanchette, S. J., Potvin, P., Houdé, O., Masson, S. et Borst, G. (2021). Inhibitory control and the understanding of buoyancy from childhood to adulthood. *Journal of Experimental Child Psychology*, 208, 105155.
- Broughton, S. H., Sinatra, G. M. et Nussbaum, E. M. (2013). "pluto has been a planet my whole life!" emotions, attitudes, and conceptual change in elementary students' learning about pluto's reclassification. *Research in Science Education*, 43(2), 529–550.
- Carlson, C. J., Gomez, A. C. R., Bansal, S. et Ryan, S. J. (2020). Misconceptions about weather and seasonality must not misguide covid-19 response. *Nature Communications*, 11(1), 4312.
- Chastenay, P. (2018). To teach or not to teach astronomy, that is the question: Results of a survey of Québec's elementary teachers. *Journal of Astronomy & Earth Sciences Education(JASE)*, 5(2), 115-136.
- Collette, F. et Angel, L. (2015). Mémoire et fonctions exécutives : nouvelles pistes de recherche. *Biologie Aujourd'hui*, 209(3), 287-294.
- Conseil des Ministres de l'Éducation (Canada). (2019). *À la hauteur: Résultats canadiens de l'étude PISA 2018 de l'OCDE.*
https://www.cmec.ca/Publications/Lists/Publications/Attachments/396/PISA2018_PublicReport_FR.pdf
- Cordova, J. R., Sinatra, G. M., Jones, S. H., Taasoobshirazi, G. et Lombardi, D. (2014). Confidence in prior knowledge, self-efficacy, interest and prior knowledge: Influences on conceptual change. *Contemporary Educational Psychology*, 39(2), 164-174.
- Diamond, A., Barnett, W. S., Thomas, J. et Munro, S. (2007). Preschool program improves cognitive control. *Science*, 318(5855), 1387–1388.
- Diamond, A. (2013). « Executive functions ». *Annual Review of Psychology*, 64(1), 135-168.
- De Villers, M. -É. (2009). *Multidictionnaire de la langue française* (6^e éd.). Québec Amérique.
- DiSessa, A. A. (2005). A History of Conceptual Change Research: Threads and Fault Lines. Dans R. Sawyer (p. 265-282), *The Cambridge Handbook of the Learning Sciences* (Cambridge Handbooks in Psychology).
- DiSessa, A. A., Gillespie, N., et Esterly, J. (2004). *Coherence versus fragmentation in the development of the concept of force.* *Cognitive Science*, 28(6), 843–900.

- Donders, F. C. (1969). « On the speed of mental processes ». *Acta Psychologica*, 30, 412-431.
- Driver, R., Asoko, H., Leach, J., Mortimer, E. et Scott, P. H. (1994). Constructing scientific knowledge in the classroom. *Educational Researcher*, 23(7), 5-12.
- Duit, R. et Treagust, D. F. (2012). How can conceptual change contribute to theory and practice in science education ?. *Second international handbook of science education*, 107-118.
- Erickson, G. L. (1979). Children's conceptions of heat and temperature. *Science Education*, 63(2), 221-230.
- Fischer, K. W. (2009). « Mind, brain and education : Building a scientific foundation for learning and teaching. », *Mind, Brain and Education*, 3(1), 3-16.
- Fortin, M. -F. et Gagnon, J. (2022). *Fondements et étapes du processus de recherche : méthodes quantitatives et qualitatives (4e édition)*. Chenelière éducation.
- Friedman, N. P. et Miyake, A. (2017). Unity and diversity of executive functions: Individual differences as a window on cognitive structure. *Cortex*, 86, 186-204.
- Fugelsang, J. A., et Dunbar, K. N. (2005). Brain-based mechanisms underlying complex causal thinking. *Neuropsychologia*, 43(8), 1204-13.
- Ganea, P. A., Larsen, N. E., et Venkadasalam, V. P. (2021). The role of alternative theories and anomalous evidence in children's scientific belief revision. *Child Development*, 92(3), 1137-1153.
- Goldberg, R. F. et Thompson-Schill, S. L. (2009). Developmental "roots" in mature biological knowledge. *Psychological Science*, 20(4), 480-487.
- Gomez, P., R. Ratcliff et M. Perea. (2007). « A model of the go/no-go task », *Journal of Experimental Psychology : General*, 136(3), 389-413.
- Gönen, S., et Kocakaya, S. (2010). A cross-age study on the understanding of heat and temperature. *International Journal of Physics & Chemistry Education*, 2(1), 1-15.
- Gulacar, O. et Fynewever, H. (2010). A research methodology for studying what makes some problems difficult to solve. *International Journal of Science Education*, 32(16), 2167-2184.
- Harle, M. et Towns, M. (2011). A review of spatial ability literature, its connection to chemistry, and implications for instruction. *Journal of Chemical Education*, 88(3), 351-360.
- Hebb, D. O. (1949). *The Organization of Behavior*. New York: Wiley.
- Hermann, R. et Lewis, B. F. (2003). Moon misconceptions. *The Science Teacher*, 70(8), 51-55.
- Houdé, O. (2000). « Inhibition and cognitive development : Object, number, categorization, and reasoning », *Cognitive Development*, 15(1), 63-73.
- Houdé, O. (2014). *Apprendre à résister*, Paris, France, Le Pommier.

- Houdé, O., Pineau, A., Leroux, G., Poirel, N., Perchey, G., Lanoe, C., Lubin, A., Turbelin, M. R., Rossi, S., et Simon, G. (2011). Functional magnetic resonance imaging study of piaget's conservation-of-number task in preschool and school-age children: a neo-piagetian approach. *Journal of Experimental Child Psychology*, 110(3), 332–346.
- Huttenlocher, P. R. et Dabholkar, A. S. (1997). Regional differences in synaptogenesis in human cerebral cortex. *Journal of Comparative Neurology*, 387(2), 167–178.
- Irwansyah et Sukarmin, et Harjana. (2018). Analysis profile of student misconceptions on the concept of fluid based instrument three-tier test. *Journal of Physics: Conference Series*, 1097(1).
- Jasien, P. G. (2011). What do you mean that "strong" doesn't mean "powerful"? *Journal of Chemical Education*, 88(9), 1247–1249.
- Kahneman, D., et Clarinard, R. (2012). *Système 1, système 2 : les deux vitesses de la pensée*. Flammarion.
- Karous, H., Nihant, B., et Leyh, B. (2022). Conceptual change in chemistry schematic modelling: a cross-sectional study of 10th-12th-grade belgian students. *Canadian Journal of Chemistry*, 100(8), 633–648.
- Kelemen, D., Rottman, J. et Seston, R. (2013). Professional physical scientists display tenacious teleological tendencies: Purpose-based reasoning as a cognitive default. *Journal of Experimental Psychology: General*, 142(4), 1074-1083.
- Kesidou, S. et Duit, R. (1993). Student's conceptions of the second law of thermodynamics: an interpretive study. *Journal of Research*, 30(1), 85-106.
- Lafortune S., Potvin, P. (2013). *Le rôle de l'inhibition dans la capacité à surmonter des interférences intuitives en sciences* (dissertation). Université du Québec à Montréal.
- Lanoë, C., Vidal, J., Lubin, A., Houde, O., et Borst, G. (2016). Inhibitory control is needed to overcome written verb inflection errors: evidence from a developmental negative priming study. *Cognitive Development*, 37, 18–27.
- Lemmer, M., Kriek, J., et Erasmus, B. (2018). Analysis of students' conceptions of basic magnetism from a complex systems perspective. *Research in Science Education*, 50(2), 375-392.
- Levy Nahum, T., Mamlok - Naaman, R., Hofstein, A. et Taber, K. S. (2010). Teaching and learning the concept of chemical bonding. *Studies in Science Education*, 46(2), 179-207.
- Linnenbrink-Garcia, L., Rogat, T. K. et Koskey, K. L. K. (2011). Affect and engagement during small group instruction. *Contemporary Educational Psychology*, 36(1), 13–24.
- Lubin, A., Vidal, J., Lanoë, C., Houdé, O. et Borst, G. (2013). Inhibitory control is needed for the resolution of arithmetic word problems: A developmental negative priming study. *Journal of Educational Psychology*, 105(3), 701-708.
- Malenfant, Robichaud, G., Masson, S. et Potvin, P. (2018). Inhibition et capacité à surmonter certaines conceptions alternatives en chimie (Mémoire). Université du Québec à Montréal.

- Masson, S. (2012). La neuroéducation : mieux comprendre le cerveau pour mieux enseigner. *Neuroeducation, 1*(1), 3–4.
- Masson, S., Potvin, P., Riopel, M., et Brault-Foisy, L.-M. (2014). Differences in brain activation between novices and experts in science during a task involving a common misconception in electricity. *Mind, Brain and Education, 8*(1), 44–55.
- Masson, S. et Borst, G. (2017). *Méthodes de recherche en neuroéducation*. Presses de l'Université du Québec.
- Masson, S. (2020). *Activer ses neurones : pour mieux apprendre et enseigner*. Odile Jacob.
- Michel, G., et Sperandio, J. C. (1996). L'analogie dans l'apprentissage de la programmation. *Sciences et Technologies de l'Information et de la Communication pour l'Éducation et la Formation, 3*(3), 335-352.
- Ministère de l'Éducation, du Loisir et du Sport. (2007). *Programme de formation de l'école québécoise. Enseignement secondaire, deuxième cycle*. Gouvernement du Québec.
- Ministère de l'Éducation, du loisir et du Sport (MELS). 2011. Progression des apprentissages au secondaire. Physique, Programme optionnel de 5e secondaire. Gouvernement du Québec.
- Ministère de l'Éducation, du Loisir et du Sport (MELS). 2011. Progression des apprentissages au secondaire. Science et technologie 1er cycle, Science et technologie 2e cycle, Science et technologie de l'environnement. Gouvernement du Québec.
- Miyake, A., Friedman, N. P., Emerson, M. J., Witzki, A. H., Howeter, A. et Wager, T. D. (2000). The unity and diversity of executive functions and their contributions to complex frontal lobe tasks: a latent variable analysis. *Cognitive Psychology, 41*(1), 49-100.
- Miyake, A. et Friedman, N. P. (2012). The nature and organization of individual differences in executive functions: four general conclusions. *Current Directions in Psychological Science, 21*(1), 8-14.
- National, S. B. (2000). Excerpts from science and engineering indicators 2000. *Science Communication, 22*(2), 226–230.
- Nenciovici, L., Brault Foisy, L. -M., Allaire-Duquette, G., Potvin, P., Riopel, M. et Masson, S. (2018). Neural correlates associated with novices correcting errors in electricity and mechanics. *Mind, Brain, and Education, 12*(3), 120–139.
- Ohlsson, S. (2009). Resubsumption: a possible mechanism for conceptual change and belief revision. *Educational Psychologist, 44*(1), 20–40.
- Ozdemir, G. (2010). Exploring visuospatial thinking in learning about mineralogy: spatial orientation ability and spatial visualization ability. *International Journal of Science and Mathematics Education, 8*(4), 737–759.

- Petitto, L. -A. et Dunbar, K. (2004, 6-8 octobre). *New findings from Educational Neuroscience on Bililingual Brains, and the Educated-Main*, Communication présentée à la Conference on building usable knowledge in Mind, Brain, & Education, Harvard Graduate School of Education, Cambridge, MA.
- Potvin, P., Masson, S., Lafortune, S. et Cyr, G. (2015). Persistence of the intuitive conception that heavier objects sink more: a reaction time study with different levels of interference. *International Journal of Science and Mathematics Education*, 13(1), 21–43.
- Potvin, P., Sauriol, É. et Riopel, M. (2015). Experimental evidence of the superiority of the prevalence model of conceptual change over the classical models and repetition. *Journal of Research in Science Teaching*, 52(8), 1082–1108.
- Potvin, P. et Cyr, G. (2017). Toward a durable prevalence of scientific conceptions: tracking the effects of two interfering misconceptions about buoyancy from preschoolers to science teachers: prevalence of conceptions about buoyancy. *Journal of Research in Science Teaching*, 54(9), 1121–1142.
- Potvin, P. (2018). *Faire apprendre les sciences et la technologie à l'école : épistémologie, didactique, sciences cognitives et neurosciences au service de l'enseignant*. Les Presses de l'Université Laval.
- Potvin P., Malenfant-Robichaud G., Cormier, C. et Masson, S. (2020) Coexistence of Misconceptions and Scientific Conceptions in Chemistry Professors: A Mental Chronometry and fMRI Study. *Front. Educ.* 5.
- Richard, Jean-François. (1990). *Les activités mentales : comprendre, raisonner, trouver des solutions*. (Ser. Collection u. psychologie). A. Colin.
- Roell, M., Viarouge, A., Houdé Olivier, et Borst Grégoire. (2019). Inhibition of the whole number bias in decimal number comparison: a developmental negative priming study. *Journal of Experimental Child Psychology*, 177, 240–247.
- Salta, K. et Tzougraki, C. (2011). Conceptual versus algorithmic problem-solving: focusing on problems dealing with conservation of matter in chemistry. *Research in Science Education*, 41(4), 587–609.
- Shtulman, A. et Valcarcel, J. (2012). Scientific knowledge suppresses but does not supplant earlier intuitions. *Cognition*, 124(2), 209–215.
- Shtulman, A. (2022). How Intuitive Beliefs Inoculate Us Against Scientific Ones. *The cognitive science of belief. A multidisciplinary approach*, 353.
- Skelling-Desmeules, Y., Brault-Foisy, L. -M., Potvin, P., Lapierre, H. G., Ahr, E., Léger, P. M., Masson, S. et Charland, P. (2021). Persistence of the "moving things are alive" heuristic into adulthood: evidence from eeg. *Cbe Life Sciences Education*, 20(3), ar45.
- Stroop, J. (1935). « Studies of interference in serial verbal reaction ». *Journal of Experimental Psychology*, 18, 643-662.
- Su, J. et Yang, W. (2023). Unlocking the power of chatgpt: a framework for applying generative ai in education. *Ecnu Review of Education*, 6(3), 355-366.

- Thibault, F., Rapin, L. et Tissier, C. (2017). L'utilisation des tests neuropsychologiques. Dans S. Masson et G. Borst (dir), *Méthodes de recherche en neuroéducation*. 1^{ère} éd., p. 255-259. Presses de l'Université du Québec.
- Thouin, M. (2001). *Notions de culture scientifique et technologique : concepts de base, percées historiques et conceptions fréquentes*. Éditions MultiMondes.
- Thouin, M. (2014). *Réaliser une recherche en didactique*. Éditions MultiMondes.
- Thouin, M. (2015). *Tester et enrichir sa culture scientifique et technologique*. Québec : Multimondes.
- Tipper, S. P. (2001). Does negative priming reflect inhibitory mechanisms? a review and integration of conflicting views. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology Section A*, 54(2), 321–343.
- Toczkowski, T. et Ralle, B. (2015). The complexity of learning and understanding in chemical education: analysis and intervention using detailed learning pathways. *LUMAT: International Journal on Math, Science and Technology Education*, 3(3), 401-408.
- Tümay, H. (2016). Reconsidering learning difficulties and misconceptions in chemistry: emergence in chemistry and its implications for chemical education. *Chemistry Education Research and Practice*, 17(2), 229–245.
- Trends in International Mathematics and Science Study (TIMSS). 2019. Highlights.
- Viarouge, A., Houdé, O. et Borst, G. (2019). Evidence for the role of inhibition in numerical comparison: A negative priming study in 7-to 8-year-olds and adults. *Journal of Experimental Child Psychology*, 186, 131-141.
- Vosniadou, S. et Skopeliti, I. (2014). Conceptual change from the framework theory side of the fence. *Science & Education: Contributions from History, Philosophy and Sociology of Science and Mathematics*, 23(7), 1427–1445.
- Wartenburger, I., Heekeren, H. R., Abutalebi, J., Cappa, S. F., Villringer, A. et Perani, D. (2003). Early setting of grammatical processing in the bilingual brain. *Neuron*, 37(1), 159–70.