

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL

EFFET DE LA FAMILIARITÉ DES CONCEPTIONS INTUITIVES ET DE LA COMPLEXITÉ DES CONCEPTS
SCIENTIFIQUES SUR LA MOBILISATION DU CONTRÔLE INHIBITEUR : UNE ÉTUDE EN AMORÇAGE
NÉGATIF CHEZ LES ÉLÈVES DU PRIMAIRE

MÉMOIRE

PRÉSENTÉ

COMME EXIGENCE PARTIELLE

MAÎTRISE EN ÉDUCATION

PAR

ÉLISABETH BÉLANGER

DÉCEMBRE 2023

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.04-2020). 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

Cette aventure à la maîtrise aura été haute en couleur. Moi qui a priori venais « faire une petite maîtrise » pour pouvoir « peut-être » enseigner un jour aux futures enseignantes et enseignants du primaire, j'ai plutôt l'impression d'avoir été happée par un tsunami d'opportunités inattendues et de défis plus stimulants les uns que les autres. Assurément, l'écriture de ce mémoire n'est que la pointe de l'iceberg qu'ont été les deux dernières années.

Dès les premiers jours, je me suis sincèrement sentie accueillie à bras ouverts par une panoplie de nouvelles personnes qui font dorénavant partie de mon quotidien d'étudiante-chercheuse. D'abord, je tiens à souligner l'apport incroyable de mon comité de direction : la professeure Lorie-Marlène Brault Foisy et le professeur Steve Masson. Ces deux professeurs, à la fois passionnés et rigoureux, ont toute mon admiration depuis les premiers jours. Lorie, tu es assurément mon coup de cœur professionnel des dernières années. Je te remercie sincèrement pour ton accompagnement hors du commun, ta générosité, ta disponibilité, ta détermination et ta personnalité pétillante. Tu as su me proposer une myriade de défis « juste assez difficiles », mais toujours atteignables. Steve, c'est d'abord et avant tout la lecture de ton livre qui m'a amenée à opter pour la concentration didactique de la maîtrise et à m'intéresser plus spécifiquement aux manières dont mieux comprendre le cerveau peut permettre de mieux enseigner. Rien qu'avec cela, ton apport est déjà un point tournant dans mon parcours professionnel. Ton soutien constant et ta rétroaction toujours constructive et bien dosée auront assurément été indispensables, particulièrement dans le sprint final qu'a été la rédaction de ce mémoire. Je remercie également le professeur Martin Riopel et la professeure Janie Brisson qui, par leurs commentaires et questionnements, ont contribué à la qualité de ce projet et à la réflexion intellectuelle qui le sous-tend.

Ce mémoire est le fruit d'un travail d'équipe auquel plusieurs personnes ont pris part à diverses étapes. Je tiens à remercier chaleureusement les collègues du projet Nagano : Patrice, Emmanuel, Karène et Mélissane. Partis de dessins de marteaux et de moteurs en feu qui poussent des balles et bravant plusieurs épisodes de surcharge cognitive, nous avons tout de même réussi à nous rendre jusqu'au bout du défi qui nous était lancé par ce projet d'envergure : concevoir quatre tâches cognitives en amorçage négatif. Sophie et Karène, votre aide pour réaliser la collecte s'est avérée précieuse, voire essentielle. J'espère que vous ne gardez pas de courbatures de tout ce transport de valises d'iPads à travers les multiples escaliers croisés durant nos visites dans les écoles. Emmanuel, ton soutien aura été central pour mener à terme les

analyses qui ont découlé de la collecte de données. Je te promets que ta super macro du LaPsyDÉ resta entre bonnes mains. Je souhaite aussi souligner le soutien moral indéfectible de mes collègues et amies de l'EREST, du LRN et de ma cohorte de maîtrise, en particulier Emma, Isabelle, Morgann, Jérémie, Émilie et Myleine. Vous avez su contribuer à ma motivation ces deux dernières années et, ultimement, au succès de ce projet.

Je tiens aussi à remercier les didacticiens qui ont accepté de prendre part à cette recherche en partageant leur expertise qui a mené au choix des contenus utilisés. Je remercie aussi les enseignantes et enseignants qui ont généreusement accepté de m'accueillir dans leur classe, d'abord pour prétester les tâches cognitives créées pour cette recherche, puis pour collecter des données. Je remercie bien évidemment tous les élèves du primaire qui ont accepté de participer de bon cœur à cette recherche impliquant malgré tout la variable *complexité*.

Je souhaite souligner l'apport du Conseil de recherche en sciences humaines (CRSH) qui supporte le projet dans lequel s'inscrit ce mémoire. Je désire aussi remercier les Fonds de recherche du Québec – Société et culture (FRQSC), la fondation de l'UQAM et la fondation Desjardins. Sans leur appui financier, je n'aurais jamais pu me consacrer pleinement à cette recherche.

En terminant, un merci spécial à Éric, mon « fan #1 », pour son soutien inébranlable, ainsi qu'à Élodie et Étienne, qui ont été « contraints » d'écouter patiemment Disney Plus pendant que maman suivait des cours plusieurs soirs d'affilés 😊

Je tiens à conclure avec cette phrase que seuls les initiés au « fameux paradigme » comprendront : la rédaction de ce mémoire était l'amorce; celle de la thèse devient la cible...

Élisabeth

DÉDICACE

À ma mère, qui aurait aimé être témoin de l'écriture de ce
mémoire.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	ii
DÉDICACE	iv
LISTE DES FIGURES	viii
LISTE DES TABLEAUX	ix
LISTE DES ABRÉVIATIONS, DES SIGLES ET DES ACRONYMES	x
RÉSUMÉ.....	xi
ABSTRACT	xii
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 PROBLÉMATIQUE	3
1.1 Importance des sciences dans la société	3
1.2 Difficultés associées à l'apprentissage des sciences	5
1.3 Conceptions intuitives : obstacle important aux apprentissages conceptuels	8
1.4 Contrôle inhibiteur et expertise en sciences	10
1.5 Question de recherche	14
CHAPITRE 2 CADRE THÉORIQUE	18
2.1 Contrôle inhibiteur.....	18
2.1.1 Fonctions exécutives et contrôle inhibiteur : modèles et définitions.....	18
2.1.2 Différentes mesures du contrôle inhibiteur	27
2.1.3 Contrôle inhibiteur et apprentissages scientifiques.....	30
2.2 Variables didactiques susceptibles d'influencer la mobilisation du contrôle inhibiteur	39
2.2.1 <i>Familiarité</i> des conceptions intuitives.....	40
2.2.1.1 Conceptions intuitives en sciences.....	40
2.2.1.2 <i>Familiarité</i> : recension et définitions.....	44
2.2.2 <i>Complexité</i> des concepts scientifiques.....	51
2.3 Hypothèses de recherche	58
CHAPITRE 3 MÉTHODOLOGIE	61
3.1 Phase 1 : Sélection des contenus scientifiques	61
3.1.1 Critères de sélection et formation du panel de didacticiens en sciences.....	63
3.1.2 Déroulement du processus d'évaluation des paires de conceptions.....	64
3.1.3 Description du questionnaire	64
3.1.4 Analyse des réponses des didacticiens.....	66

3.1.5	Sélection finale des contenus	66
3.2	Phase 2 : Conception des tâches cognitives	69
3.2.1	Choix de la méthode de recherche.....	69
3.2.2	Description des instruments de collecte	75
3.2.2.1	Conception générale	76
3.2.2.2	Tâche 1 : Magnétisme	80
3.2.2.3	Tâche 2 : États solide et liquide.....	82
3.2.2.4	Tâche 3 : Système Terre-Lune-Soleil.....	85
3.2.2.5	Tâche 4 : Flottabilité	87
3.3	Phase 3 : Passation des tâches cognitives	90
3.3.1	Critères de sélection des participants	91
3.3.2	Modalités de recrutement et d'échantillonnage	91
3.3.3	Déroulement de la collecte de données.....	93
3.4	Phase 4 : Modalités d'analyse des données	95
3.5	Considérations éthiques	98
3.5.1	Obtention du consentement éclairé	99
3.5.2	Respect de la confidentialité et de l'anonymat.....	99
CHAPITRE 4 RÉSULTATS.....		101
4.1	Amorces	101
4.2	Cibles.....	105
CHAPITRE 5 DISCUSSION		113
5.1	Amorces et effets d'interférence.....	114
5.2	Cibles et effets d'amorçage négatif.....	116
5.3	Effets des variables didactiques sur la mobilisation du contrôle inhibiteur	123
5.4	Contributions	125
5.4.1	Retombées pour la recherche	125
5.4.2	Implications pédagogiques	127
5.5	Limites et pistes de recherches futures.....	129
CONCLUSION		132
ANNEXE A MATÉRIEL DE RECRUTEMENT.....		135
ANNEXE B FORMULAIRE DE CONSENTEMENT DESTINÉ AUX DIDACTIENS.....		139
ANNEXE C EXTRAITS DU QUESTIONNAIRE DESTINÉ AUX DIDACTIENS.....		142
ANNEXE D TÂCHE 1 : MAGNÉTISME		145
ANNEXE E TÂCHE 2 : ÉTATS SOLIDE ET LIQUIDE		148

ANNEXE F TÂCHE 3 : SYSTÈME TERRE-LUNE-SOLEIL.....	151
ANNEXE G TÂCHE 4 : FLOTTABILITÉ	154
ANNEXE H FORMULAIRE D'INFORMATION ET DE CONSENTEMENT DESTINÉ AUX ÉLÈVES ET À LEURS PARENTS.....	157
ANNEXE I PROTOCOLE D'EXPÉRIMENTATION.....	161
RÉFÉRENCES	167

LISTE DES FIGURES

Figure 2.1 IES obtenu en cible pour la condition test pour chaque groupe d'âge lors de la complétion des deux tâches de Brault Foisy et ses collaborateurs (2021; en révision)	37
Figure 2.2 Modèle des trois systèmes cognitifs adapté à l'apprentissage des sciences	38
Figure 3.1 Répartition des 8 paires de conceptions au regard de leur familiarité et de leur complexité ...	68
Figure 3.2 Trois types d'items fréquemment utilisés dans la conception de tâches cognitives	71
Figure 3.3 Représentation du paradigme expérimental d'amorçage positif.....	73
Figure 3.4 Représentation du paradigme expérimental d'amorçage négatif	74
Figure 3.5 Déroulement temporel des quatre tâches conçues selon le paradigme d'amorçage négatif ...	79
Figure 3.6 Items utilisés dans la tâche 1 portant sur le magnétisme	81
Figure 3.7 Déroulement temporel des essais pour la tâche 1	82
Figure 3.8 Items utilisés dans la tâche 2 portant sur les états solide et liquide de la matière.....	83
Figure 3.9 Déroulement temporel des essais pour la tâche 2	84
Figure 3.10 Items utilisés dans la tâche 3 portant sur le système Terre-Lune-Soleil	86
Figure 3.11 Déroulement temporel des essais pour la tâche 3	87
Figure 3.12 Items utilisés dans la tâche 4 portant sur la flottabilité	88
Figure 3.13 Déroulement temporel des essais pour la tâche 4	90
Figure 4.1 Performance des élèves en amorce en fonction du type d'amorce	103
Figure 4.2 Temps de réponse des élèves en amorce en fonction du type d'amorce	105
Figure 4.3 Performance des élèves en cible en fonction du type d'amorce	107
Figure 4.4 Temps de réponse des élèves en cible en fonction du type d'amorce	110
Figure 4.5 Effets d'interaction des variables familiarité et complexité sur les temps de réponse en cible	111
Figure 4.6 Synthèse des deux effets d'interaction observés sur les temps de réponse en cible	111

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1 Hypothèses de recherche.....	59
Tableau 3.1 Représentation des quatre conditions expérimentales.....	62
Tableau 3.2 Paires de conceptions évaluées par le panel de didacticiens	63
Tableau 3.3 Scores de familiarité et de complexité.....	67
Tableau 3.4 Paires de conceptions correspondant aux quatre conditions expérimentales	69
Tableau 3.5 Caractéristiques de l'échantillon final (n = 45).....	93
Tableau 4.1 Performance en amorce (taux de réponses correctes) en fonction du type d'amorce et des niveaux faible et élevé des variables familiarité et complexité	101
Tableau 4.2 Effets globaux de l'ANOVA à mesures répétées sur la performance en amorce	102
Tableau 4.3 Temps de réponse en amorce (ms) en fonction du type d'amorce et des niveaux faible et élevé des variables familiarité et complexité	103
Tableau 4.4 Effets globaux de l'ANOVA à mesures répétées sur les temps de réponse en amorce	104
Tableau 4.5 Synthèse des effets d'interférence observés en amorce.....	105
Tableau 4.6 Performance (taux de réponses correctes) en cible en fonction du type d'amorce et des niveaux faible et élevé des variables familiarité et complexité.....	106
Tableau 4.7 Effets globaux de l'ANOVA à mesures répétées sur la performance en cible	106
Tableau 4.8 Temps de réponse en cible (ms) en fonction du type d'amorce et des niveaux faible et élevé des variables familiarité et complexité	108
Tableau 4.9 Effets globaux de l'ANOVA à mesures répétées sur les temps de réponse en cible	109
Tableau 4.10 Effets d'amorçage négatif dégagés pour les quatre conditions	112

LISTE DES ABRÉVIATIONS, DES SIGLES ET DES ACRONYMES

CSSDM : Centre de services scolaire de Montréal

EEG : Électroencéphalographie

IRMf : Imagerie par résonance magnétique fonctionnelle

OCDE : Organisation de coopération et de développement économiques

PFEQ : Programme de formation de l'école québécoise

TIMSS : Trends in International Mathematics and Science Study / Enquête internationale sur les acquis scolaires en sciences et en mathématiques

PISA : Programme for International Student Assessment / Programme international pour le suivi des acquis des élèves

UNESCO : Organisation des Nations unies pour l'éducation, la science et la culture

RÉSUMÉ

Un vaste corpus de recherches met en évidence que les difficultés persistantes des élèves en sciences sont en partie causées par les conceptions intuitives variées qu'ils entretiennent à propos des phénomènes qui les entourent (diSessa, 2014). Celles-ci interfèrent souvent avec les concepts scientifiques enseignés en classe. Il a longtemps été présumé que les conceptions intuitives des élèves disparaissaient à la suite de l'apprentissage de concepts scientifiques (Posner *et al.*, 1982). Or, plusieurs recherches indiquent qu'elles ont plutôt tendance à coexister avec les concepts scientifiques (Babai *et al.*, 2010; Potvin et Cyr, 2017; Shtulman et Harrington, 2015; Shtulman et Valcarcel, 2012). À cet égard, le contrôle inhibiteur semble jouer un rôle central dans les apprentissages scientifiques : ce processus cognitif permettrait à l'élève de résister à ses conceptions intuitives afin de mobiliser des concepts scientifiques lorsque la situation l'exige (Allaire-Duquette *et al.*, 2019; Masson *et al.*, 2014). Par ailleurs, certaines recherches suggèrent que la mobilisation du contrôle inhibiteur serait influencée par différentes variables : il serait ainsi plus difficile de résister à certaines conceptions intuitives qu'à d'autres, tandis que certains concepts scientifiques seraient plus difficiles à mobiliser que d'autres (Brault Foisy *et al.*, 2021).

S'inscrivant dans une perspective de continuité avec les recherches portant sur le contrôle inhibiteur, l'objectif de cette recherche était d'étudier les effets de deux variables sur sa mobilisation, soit la **familiarité** des conceptions intuitives et la **complexité** des concepts scientifiques. Les hypothèses de recherche étaient les suivantes : (1) plus le niveau de **familiarité** d'une conception intuitive est faible et plus le concept scientifique qui lui est associé à un faible niveau de **complexité**, moins la mobilisation du contrôle inhibiteur sera importante. À l'opposé, (2) un niveau élevé des deux variables pourrait exiger une mobilisation plus importante du contrôle inhibiteur. Quatre tâches cognitives informatisées, correspondant au croisement des niveaux faible et élevé des variables, ont été conçues de manière à permettre l'utilisation d'un paradigme d'amorçage négatif (Borst *et al.*, 2013a; Tipper, 1985, 2001). Ce paradigme expérimental s'appuie des données comportementales pour inférer la mobilisation du contrôle inhibiteur. Les quatre tâches ont été complétées par 128 élèves du 3^e cycle fréquentant des écoles primaires publiques de Montréal.

Les analyses visaient principalement à dégager des effets d'amorçage négatif, c'est-à-dire des écarts significatifs quant à la performance et aux temps de réponse des élèves, associés à la mobilisation du contrôle inhibiteur. L'analyse de la **performance** des élèves révèle un effet d'amorçage négatif lorsque les niveaux des variables **familiarité** et **complexité** sont élevés. Par ailleurs, l'analyse des **temps de réponse** indique qu'un effet d'amorçage négatif est présent lorsque le niveau de **complexité** est élevé, tandis qu'aucun effet n'est observé lorsque le niveau de **complexité** est faible. Ces résultats suggèrent que certains concepts scientifiques pourraient être plus difficiles à mobiliser non seulement parce qu'ils nécessitent que l'élève résiste à une conception intuitive et non seulement parce qu'ils sont plus complexes, mais bien en raison d'une combinaison de ces deux éléments. Conséquemment, une attention particulière devrait être portée aux stratégies pédagogiques utilisées lors de l'enseignement de concepts complexes pour lesquelles des conceptions intuitives familières interfèrent afin de favoriser l'apprentissage et la réussite des élèves. Les résultats de ce mémoire ouvrent la voie à d'autres recherches portant sur les variables pouvant influencer la mobilisation du contrôle inhibiteur.

Mots clés : contrôle inhibiteur, fonction exécutive, didactique des sciences au primaire, changement conceptuel, familiarité, complexité, amorçage négatif.

ABSTRACT

Effect of Familiarity and Complexity Variables on Inhibitory Control: A Negative Priming Study in Elementary Science Learning

A large body of research suggests that students' persistent difficulties in science are partly caused by intuitive conceptions they hold about phenomena around them, which interfere with the scientific conceptions taught in class (diSessa, 2014). It has long been assumed that students' intuitive conceptions disappear because of learning scientific conceptions. However, some studies indicate that they rather tend to coexist with scientific conceptions (Babai *et al.*, 2010; Potvin & Cyr, 2017; Shtulman & Harrington, 2015; Shtulman & Valcarcel, 2012). Inhibitory control seems to play a central role in science learning: this cognitive process enables students to resist their intuitive conceptions to mobilize scientific conceptions when the context demands it (Allaire-Duquette *et al.*, 2019; Masson *et al.*, 2014). Furthermore, research has shown that the mobilization of inhibitory control is influenced by different variables: it seems to be more difficult to resist certain intuitive conceptions than others, while certain scientific conceptions are more difficult to mobilize than others (Brault Foisy *et al.*, 2021).

Following on from recent research on inhibitory control, this research aimed to study the effects of two content-related variables on inhibitory control mobilization: the **familiarity** of intuitive conceptions and the **complexity** of scientific conceptions. The research hypotheses were as follows: (1) a low level of **familiarity** of an intuitive conception and a low level of **complexity** of the associated scientific concept will require a lower mobilization of inhibitory control, whereas (2) a high level of both variables will be associated with a greater mobilization of inhibitory control. Four computerized cognitive tasks, corresponding to the intersection of the low and high levels of **familiarity** and **complexity** variables, were designed to use a negative priming paradigm (Borst *et al.*, 2013a; Tipper, 1985, 2001). This experimental paradigm relies on behavioral data to infer the mobilization of inhibitory control. The four tasks were completed by 128 grades 5-6th students in public elementary schools in Montreal.

The main aim of the analyses was to identify negative priming effects, i.e., significant differences in children accuracy and response times, associated with the mobilization of inhibitory control. Analysis of children **accuracy** revealed a negative priming effect when the levels of the **familiarity** and **complexity** variables were both high. On the other hand, the analysis of **response times** indicates that a negative priming effect is present when the level of **complexity** is high, while no effect is observed when the level of **complexity** is low. These results suggest that some scientific conceptions may be more difficult to mobilize not only because they require children to resist intuitive conception, and not only because they are more complex, but because of a combination of both. Consequently, special attention should be paid to the pedagogical strategies used when teaching complex concepts in which familiar intuitive conceptions interfere, in order to promote children learning. The results of this work pave the way for further research into the variables that can influence the mobilization of inhibitory control.

Keywords: inhibitory control, executive function, elementary science learning, conceptual change, familiarity, complexity, negative priming.

INTRODUCTION

Depuis longtemps, l'apprentissage des sciences est réputé particulièrement difficile, faisant en sorte que plusieurs chercheurs ont tenté d'identifier les facteurs pouvant expliquer l'origine des difficultés associées à l'apprentissage des sciences (Johnstone, 1991). Depuis les années 70, plusieurs recherches indiquent que certaines difficultés persistantes seraient causées par l'existence de conceptions intuitives qu'entretiennent souvent les élèves à propos des phénomènes qui les entourent (Carey, 2000; Sinatra *et al.*, 2014; Vosniadou *et al.*, 2018a) et qui interfèrent avec les concepts scientifiques à apprendre en classe.

Les conceptions intuitives se construisent souvent durant la petite enfance, à travers les observations que fait l'enfant du monde qui l'entoure et ses expérimentations personnelles (Thouin, 2017). Ces conceptions représentent des explications relativement fonctionnelles, qui peuvent même s'avérer utiles dans certains contextes (Potvin, 2018), bien qu'elles ne soient pas conformes aux connaissances scientifiques actuelles. Il a longtemps été présumé qu'elles disparaissaient suite à l'apprentissage des concepts scientifiques, engendrant ainsi un changement conceptuel chez les élèves (voir par ex. Giordan et de Vecchi, 1987; Posner *et al.*, 1982; Vosniadou, 1994). Or, plusieurs études indiquent qu'elles ont plutôt tendance à coexister avec les concepts scientifiques (Babai *et al.*, 2010; Shtulman et Valcarcel, 2012; Shtulman et Harrington, 2015; Zaitchik et Solomon, 2008). Ainsi, les modèles plus récents du changement conceptuel suggèrent que les conceptions intuitives des élèves ne disparaîtraient pas à la suite de l'apprentissage des concepts scientifiques (voir par ex. Potvin, 2013).

Qui plus est, le développement de technologies de pointe, notamment celui de l'imagerie cérébrale, a ouvert la voie à des recherches utilisant des instruments permettant d'observer plus directement les mécanismes cognitifs et cérébraux à l'œuvre dans le raisonnement et l'apprentissage (OCDE, 2007). Un élément fondamental qui ressort de ces recherches concerne le rôle central que joue le contrôle inhibiteur pour différents apprentissages contre-intuitifs, notamment pour les apprentissages scientifiques (Allaire-Duquette *et al.*, 2019; Brault Foisy *et al.*, 2015; Dunbar *et al.*, 2007; Masson *et al.*, 2014). Le contrôle inhibiteur, associé au cortex préfrontal du cerveau, permet à l'individu de « résister » à ses pensées intuitives, spontanées ou automatiques qui surviennent souvent plus rapidement (Houdé et Borst, 2015). Ce faisant, il permet la sélection de réponses alternatives moins automatiques, mais qui sont le produit d'un raisonnement analytique conscient, contrôlé, mais souvent plus lent (Houdé et Borst, 2015; Mostofsky et Simmonds, 2008). Les recherches les plus récentes suggèrent toutefois que la mobilisation

du contrôle inhibiteur varie en fonction du contenu que l'élève doit apprendre (Brault Foisy *et al.*, 2021; Brault Foisy *et al.*, en révision). En ce sens, il semblerait qu'il soit plus difficile de résister à certaines conceptions intuitives qu'à d'autres. Également, certains concepts scientifiques semblent plus difficiles à mobiliser que d'autres. Ces observations suggèrent que des variables liées aux contenus d'apprentissage pourraient influencer le contrôle inhibiteur nécessaire pour raisonner de manière appropriée selon le contexte.

S'inscrivant dans une perspective de continuité avec les recherches portant sur le rôle du contrôle inhibiteur au regard d'apprentissages scientifiques, cette recherche tente de déterminer quelles variables influencent la mobilisation du contrôle inhibiteur lorsque des élèves doivent résister à des conceptions intuitives fréquentes afin de sélectionner et mobiliser le concept scientifique approprié. Une compréhension plus approfondie des variables qui influencent le contrôle inhibiteur est susceptible de contribuer à une meilleure compréhension des difficultés associées à l'apprentissage des sciences, en plus de fournir des points de repère permettant de développer des interventions pédagogiques différenciées en fonction des contenus à apprendre.

Le premier chapitre de ce mémoire pose la problématique éducative à l'origine de cette recherche, ancrée dans l'importance de la culture scientifique. Il expose également le problème de recherche, justifie la pertinence scientifique et sociale de cette recherche et se termine par la question à laquelle cette recherche tente de répondre. Le cadre théorique constitue le deuxième chapitre de ce mémoire. Il présente d'abord le concept central de cette recherche, soit le contrôle inhibiteur, puis les variables susceptibles d'influencer sa mobilisation. Il discute également des résultats de recherche récents portant sur le rôle du contrôle inhibiteur dans le contexte de l'apprentissage des sciences. Ce chapitre se termine par la formulation des hypothèses de recherche. Le troisième chapitre présente le devis méthodologique retenu pour répondre à la question de recherche. Celui-ci se divise en quatre phases distinctes. Les instruments de collecte, les modalités de recrutement, le déroulement de la collecte dans les classes du primaire et les modalités d'analyse sont présentés dans ce chapitre. Le quatrième chapitre présente les résultats obtenus suite à l'analyse des données. Le dernier chapitre discute des résultats de manière à répondre à la question de recherche. Enfin, les retombées scientifiques et pédagogiques, ainsi que les limites de la présente recherche et des pistes de recherche futures, sont mises en évidence.

CHAPITRE 1

PROBLÉMATIQUE

Ce chapitre présente la problématique éducative à l'origine de ce projet de recherche, ancrée dans l'importance que revêt la culture scientifique. Celle-ci sera développée dans les sections qui suivent. D'abord, les difficultés associées à l'apprentissage des sciences sont abordées, puis discutées au regard de différents facteurs susceptibles d'expliquer leurs origines. Par la suite, l'accent sera mis sur les conceptions intuitives qu'entretiennent souvent les élèves et qui sont considérées par plusieurs didacticiens comme étant un obstacle majeur à l'apprentissage des sciences. Le rôle du contrôle inhibiteur, un processus cognitif central dans l'apprentissage des sciences, est ensuite discuté en lien avec les conceptions intuitives des élèves. Ces différents éléments mènent à la formulation de la question de recherche. Ce chapitre se termine en présentant les incidences possibles de cette recherche, tant sur le plan scientifique que social.

1.1 Importance des sciences dans la société

Au fil des ans, les sciences ont amélioré considérablement la qualité et l'espérance de vie à l'échelle planétaire. Que ce soit par des découvertes médicales, pharmaceutiques ou environnementales, les avancées scientifiques permettent aux humains d'accéder à une meilleure qualité de vie. Selon l'UNESCO (2021a), les sciences représentent la plus grande entreprise collective. Puisque les défis mondiaux du 21^e siècle transcendent les barrières disciplinaires traditionnelles, la science, l'innovation et les technologies apparaissent plus que jamais primordiales pour répondre aux différents enjeux humanitaires. Sur le plan politique, ce sont d'ailleurs très souvent les données scientifiques qui orientent les décisions gouvernementales; que ce soit en matière de lutte aux changements climatiques, de préservation de la biodiversité, de santé, d'éducation ou de gestion des eaux pour ne donner que quelques exemples. La pandémie de COVID-19 a également souligné l'importance de la science pour faire face à une crise d'envergure mondiale (Marchildon, 2021). De nombreux scientifiques ont en ce sens joué un rôle de premier plan à diverses étapes de la pandémie, tant pour vulgariser l'information que pour contribuer à partager des découvertes susceptibles de résoudre la situation ou d'en minimiser les conséquences négatives.

Qui plus est, pour faire face efficacement aux enjeux humanitaires, il apparaît primordial que la science soit non seulement accessible pour les décideurs politiques, mais également pour les citoyens afin qu'ils développent une compréhension du langage propre aux sciences ainsi qu'un niveau élevé de culture

scientifique (UNESCO, 2021a). Par exemple, dans le contexte de la pandémie de COVID-19, il s'est avéré crucial que la population comprenne certaines notions scientifiques de base, notamment concernant la propagation d'un virus, afin de s'en protéger adéquatement. De plus, afin de comprendre l'importance de la vaccination, les citoyens doivent posséder des connaissances scientifiques au sujet du fonctionnement d'un vaccin sur le corps humain et de manière plus générale, sur la façon dont la vaccination peut contribuer à éradiquer une maladie contagieuse (Renouard et Mazabraud, 2018). À ce propos, il a été démontré que les connaissances scientifiques limitent la désinformation, voire l'adhésion à des théories de nature conspirationniste (Dornan, 2020). Un autre exemple qui met de l'avant la nécessité de développer un niveau élevé de culture scientifique concerne le réchauffement climatique. En effet, non seulement les gouvernements doivent comprendre ce qui cause le réchauffement planétaire afin de prendre des décisions éclairées, mais les citoyens doivent aussi être en mesure de réaliser que le réchauffement climatique est attribuable à des actions humaines auxquelles ils prennent souvent part. Pour que les citoyens sachent quels gestes poser afin de remédier à cette problématique d'envergure planétaire, ils doivent ainsi comprendre certains concepts scientifiques, tels que les gaz à effet de serre.

Un autre élément qui ressort dans l'actualité concerne la confiance des gens envers les sciences qui est souvent biaisée par des croyances personnelles. Un important sondage réalisé en 2018 auprès de 14 000 personnes met en évidence que près du tiers des répondants ignore les découvertes scientifiques qui ne cadrent pas avec leurs convictions personnelles (Weber, 2019). Appelée biais de confirmation dans la littérature scientifique, cette tendance voulant que les gens recherchent des informations qui confirment leur opinion est d'ailleurs bien documentée, notamment comme étant un obstacle au développement de la pensée critique (Halpern, 2014). Un autre élément qui ressort de ce sondage est que près de la moitié des répondants considèrent que les scientifiques sont élitistes. Un tiers pense que la science est influencée par les intérêts des entreprises, tandis qu'un autre tiers croit qu'elle est influencée par ceux des gouvernements. Ces données sont préoccupantes puisque la science se base sur des données empiriques qui sont le fruit des travaux d'une communauté de chercheurs et non sur des croyances personnelles (Marchildon, 2021).

Le niveau de culture scientifique des individus a donc des répercussions importantes sur la compréhension des enjeux planétaires ainsi que sur la prise de décision quotidienne (Renouard et Mazabraud, 2018; Sinatra *et al.*, 2014) de même que, plus largement, sur l'engagement citoyen et politique (Shtulman et Harrington, 2015). Considérant que les enfants et les adolescents seront appelés à prendre des décisions

citoyennes en grandissant, il apparaît primordial de s'assurer qu'ils développent leur culture scientifique de façon à pouvoir bien comprendre les enjeux auxquels tous les citoyens sont confrontés.

Pour ce faire, la science fait partie des programmes éducatifs dans la majorité des pays du monde. Dès la petite enfance, l'éveil aux sciences s'inscrit dans les programmes éducatifs (p. ex. Gouvernement du Québec, 2019; Gouvernement du Québec, 2021), proposant ainsi une initiation à la démarche scientifique qui se vit notamment en accompagnant le jeune enfant à travers ses questionnements sur le monde. L'OCDE soutient d'ailleurs qu'un contact positif avec la science dès un jeune âge peut avoir un impact positif durable sur l'éducation scientifique (OCDE, 2018). Par la suite, les sciences et technologies sont enseignées de manière plus formelle au primaire et au secondaire. Par exemple, au Québec, cette discipline fait partie du Programme de formation de l'école québécoise (Gouvernement du Québec, 2006a); son enseignement est donc obligatoire et fait partie intégrante du cursus scolaire régulier. Au primaire, les contenus scientifiques de ce programme sont regroupés en trois grandes catégories : univers vivant, univers matériel et Terre et espace. Les élèves sont ainsi appelés à développer leurs connaissances relatives aux sciences durant l'ensemble de leur parcours scolaire au primaire. Au secondaire, les contenus d'apprentissage touchent les trois mêmes univers, auxquels s'ajoute l'univers technologique (Gouvernement du Québec, 2006b). Dans plusieurs écoles secondaires, des programmes de sciences enrichis et des activités parascolaires d'ordre technologique ou scientifique sont également proposés aux élèves. Les programmes éducatifs en sciences sont structurés de manière similaire et abordent les mêmes contenus d'apprentissage dans les autres provinces canadiennes (p. ex. Gouvernement de l'Ontario, 2007) ainsi que dans plusieurs pays, notamment aux États-Unis, au Danemark, en Finlande et en France (TIMSS Encyclopedia, 2015).

1.2 Difficultés associées à l'apprentissage des sciences

Or, malgré la place centrale des sciences dans les programmes de formation, les résultats de nombreuses enquêtes internationales révèlent qu'une proportion importante d'élèves du primaire, d'élèves du secondaire et même d'adultes éprouve des difficultés à développer une compréhension satisfaisante de plusieurs concepts scientifiques. Selon l'enquête TIMSS (2019), seulement 6 % des élèves de 4^e année et 7 % des élèves de 2^e secondaire seraient très performants en sciences (Mullis *et al.*, 2020). De plus, 15 % des élèves de 2^e secondaire n'atteignent même pas un niveau considéré faible (« *low benchmark* ») (Mullis *et al.*, 2020). Cela signifie que ces élèves ont une compréhension conceptuelle très limitée ainsi qu'un faible niveau de connaissances scientifiques. De surcroît, les tendances générales de l'enquête TIMSS

indiquent que les résultats des élèves en sciences stagnent au primaire : entre 2015 et 2019, les résultats ont augmenté dans dix pays, mais ont diminué dans dix autres, ce qui soulève des questionnements quant à l'évolution des résultats en sciences. Les résultats de l'enquête PISA (2018), quant à eux, révèlent que seulement 7 % des élèves de 15 ans sont très performants en sciences, tandis que seulement 52 % d'entre eux atteignent le niveau 3, qui se caractérise, entre autres, par la capacité à distinguer des faits scientifiques de faits qui ne le sont pas et à identifier les preuves qui appuient ou non la validité d'une affirmation scientifique (OCDE, 2019a, 2019b).

Force est de constater que les résultats des élèves aux différentes enquêtes internationales sont préoccupants. Par ailleurs, il semble que les sciences sont depuis longtemps identifiées comme étant un apprentissage difficile (Johnstone, 1991) et plusieurs chercheurs et didacticiens en sciences ont travaillé à identifier les facteurs pouvant contribuer aux difficultés que rencontrent les élèves à l'école lors de l'apprentissage de concepts scientifiques (Millar, 1991). Un premier facteur susceptible d'expliquer les difficultés des élèves concerne la place accordée à l'enseignement des sciences dans les écoles primaires. Bien que l'enseignement des sciences fasse partie du curriculum officiel, cette discipline est souvent laissée pour compte. Un sondage réalisé en 2015 au Québec auprès de 500 enseignants du primaire révèle d'ailleurs que 7 % d'entre eux ne font pas de sciences et que la grande majorité, soit 68 %, n'en fait qu'une heure par semaine (Chastenay, 2018). Le Conseil supérieur de l'éducation abonde aussi en ce sens : les prescriptions officielles en ce qui a trait à l'enseignement des sciences et des technologies au primaire ne sont pas toujours respectées (Brisson *et al.*, 2013). En outre, l'enquête TIMSS (2019) met en lumière que les enseignants se sentent souvent peu outillés pour enseigner les sciences au primaire (Mullis *et al.*, 2020). Des chercheurs mentionnent que plusieurs enseignants manifestent de l'insécurité au plan conceptuel (Minier et Gauthier, 2006), tandis que d'autres entretiennent de fausses conceptions qui peuvent avoir une influence négative sur la qualité de leur enseignement des sciences (McComas *et al.*, 1998). Ces éléments soulignent donc que si les enseignants ne se sentent pas suffisamment compétents en science, cela ne les incite pas à accorder une place importante à cette discipline en classe, ce qui peut avoir des conséquences sur la qualité des apprentissages scientifiques réalisés par leur groupe d'élèves durant l'année scolaire.

Un autre facteur évoqué dans la littérature scientifique pour expliquer les difficultés rencontrées par les élèves en sciences concerne l'intérêt qu'ils entretiennent à l'égard de cette discipline. En effet, les sciences sont souvent perçues comme une « discipline amour-haine qui suscite des émotions fortes chez les

élèves » (Osborne *et al.*, 2003, p. 1059, traduction libre). En effectuant une recension des écrits portant sur l'intérêt à l'égard des sciences, Potvin et Hasni (2014b) ont relevé que près de la moitié des études publiées à ce moment-là établissaient une corrélation positive entre l'intérêt et la réussite des élèves en sciences. Un autre élément qui ressort des recherches portant sur l'intérêt des élèves face aux sciences est que celui-ci tend à diminuer considérablement lors du passage du primaire au secondaire (Anderhag *et al.*, 2016; Osborne *et al.*, 2003; Potvin et Hasni, 2014a). En convergence avec ces études, 52 % des élèves participants au TIMSS (2019) en 4^e année affirment avoir un niveau d'intérêt élevé pour les sciences, mais seulement 35 % des élèves de 2^e secondaire abondent en ce sens (Mullis *et al.*, 2020). Il semble que les élèves qui entretiennent un intérêt marqué pour l'apprentissage des sciences ont non seulement tendance à vouloir accroître leurs connaissances scientifiques, mais aussi à persister davantage lors des tâches difficiles (Bruyère et Potvin, 2014). Le niveau d'intérêt des élèves est donc un facteur pouvant expliquer certaines difficultés rencontrées lors d'apprentissages en sciences.

Certains auteurs évoquent aussi que le niveau de maîtrise de la langue d'enseignement pourrait contribuer aux difficultés en sciences (Thouin, 2017). Ainsi, des élèves qui ont de la difficulté en lecture trouveront plus ardue la lecture de textes scientifiques. D'ailleurs, la réussite en lecture est généralement associée à la réussite dans les autres disciplines scolaires (Réseau Réussite Montréal, 2021). Certains élèves pourraient avoir du mal à formuler des hypothèses ou à élaborer une explication scientifique par écrit lors d'un examen. Communiquer avec le langage spécialisé des sciences pourrait aussi être source de difficultés pour les élèves qui ne maîtrisent pas bien la langue d'enseignement.

Enfin, certains facteurs sociaux ou personnels pourraient aussi expliquer certaines difficultés en sciences, comme les croyances religieuses, l'environnement familial et les craintes personnelles (Thouin, 2017). Par exemple, la peur des insectes pourrait être un frein à l'apprentissage de ce qui les caractérise. La peur du feu ou des explosions pourrait poser problème lors de l'apprentissage des réactions chimiques. Également, certaines croyances religieuses entrent parfois en contradiction avec la science, par exemple, en ce qui concerne l'origine du monde ou la théorie de l'évolution. Certaines familles véhiculent aussi des propos sexistes voulant que la science, la technologie ou les métiers techniques ne soient pas pour les filles. Les convictions personnelles (Kunda, 1990), l'appartenance à un groupe (Sinatra *et al.*, 2014) et le contexte (Stahl, 2011) peuvent également influencer la manière dont l'information scientifique est traitée émotivement et cognitivement par un individu.

Or, bien que tous ces facteurs puissent expliquer certaines facettes des difficultés en sciences, ils ne permettent pas d'expliquer la récurrence et la fréquence de certaines erreurs présentes chez un grand nombre d'élèves, surtout en ce qui a trait aux erreurs conceptuelles, un élément pourtant central à la compréhension en sciences (Potvin, 2018). Un examen attentif des erreurs fréquentes au regard de certains concepts scientifiques révèle en effet que la majorité d'entre elles sont récurrentes et présentent une certaine forme de cohérence qui ne pourrait pas être attribuable au hasard (Astolfi, 2006; Potvin, 2018). Cela laisse entendre qu'en plus des facteurs discutés précédemment, la cause de certaines erreurs conceptuelles en sciences pourrait être plus fondamentale. À ce propos, depuis les années 1970, la littérature scientifique en didactique des sciences a mis en évidence que les difficultés persistantes seraient souvent attribuables à l'existence de conceptions intuitives qu'entretiennent souvent les élèves à propos des phénomènes qui les entourent (Carey, 2000). Souvent, ces conceptions ne sont pas conformes aux savoirs scientifiques, et peuvent ainsi représenter un obstacle important aux apprentissages. Cette idée est discutée plus en détail dans la section qui suit.

1.3 Conceptions intuitives : obstacle important aux apprentissages conceptuels

Sur le plan didactique, un élément qui semble être à l'origine de difficultés conceptuelles fréquemment rencontrées par les élèves concerne l'existence de conceptions intuitives qui sont incompatibles avec les savoirs scientifiques (Carey, 2000; Vosniadou, 1994). Des recherches en didactique des sciences indiquent en effet que les élèves entretiennent souvent diverses conceptions intuitives à propos des phénomènes scientifiques qui les entourent (diSessa, 2014). Par exemple, plusieurs élèves croient que les objets lourds coulent et que les objets légers flottent (Potvin *et al.*, 2015). Cette conception intuitive est l'une des plus documentées par les recherches en didactique des sciences (Brault Foisy *et al.*, 2021; Hsin et Wu, 2011; Potvin et Cyr, 2017). Pourtant, cette conception est erronée puisque la flottabilité ne dépend pas seulement de la masse, mais bien de la densité de l'objet et du liquide dans lequel il se trouve. D'autres élèves pourraient aussi croire que le Soleil tourne autour de la Terre, car ils peuvent avoir l'impression de le voir se déplacer dans le ciel. En biologie, une conception intuitive répandue suggère que « les choses qui sont mobiles sont nécessairement vivantes » (Babai *et al.*, 2010; Carey *et al.*, 2015; Opfer et Siegler, 2004). En astronomie, certaines personnes croient qu'il fait plus chaud en été parce que la Terre est plus près du Soleil durant cette saison (Murphy et Alexander, 2008). Les conceptions intuitives paraissent donc présentes pour toutes les disciplines scientifiques : la baleine est un poisson, le Soleil est une boule de feu et les nuages sont du gaz, en sont d'autres exemples. Thouin (2017) a répertorié plus d'une centaine de conceptions intuitives entretenues par les élèves de différents âges. De plus, ces conceptions intuitives

concernent autant l'apprentissage de concepts simples qui sont enseignés dès le primaire que l'apprentissage de concepts plus complexes enseignés au secondaire.

Le fait que ces conceptions intuitives soient nombreuses et omniprésentes a donné naissance à un champ de recherche spécifique : celui du changement conceptuel (diSessa, 2014). Les recherches issues de ce champ ont permis de mieux documenter les caractéristiques des conceptions intuitives entretenues fréquemment. D'abord, il semble que celles-ci prennent souvent racine dans les expériences personnelles de l'élève, dans ses observations quotidiennes et dans les explications que les adultes lui donnent à propos des phénomènes qui l'entourent, et ce, dès un très jeune âge (Thouin, 2017). Pour reprendre l'exemple précédent concernant la flottabilité, il est probable qu'un enfant qui lance un caillou dans un lac ou qui fait flotter un canard de plastique dans son bain expérimente le principe de flottabilité, mais également qu'il développe des conceptions intuitives entourant ce principe. En ce sens, un canard de plastique est petit et léger, ce qui peut contribuer à renforcer l'intuition suggérant que les objets petits ou légers flottent. À l'inverse, le caillou est plus lourd et coule; l'enfant pourrait ainsi en faire une association intuitive. Les conceptions intuitives peuvent également venir de l'école, que ce soit par le contact avec des images dans des manuels scolaires ou par les propos d'un enseignant, ou encore, des médias (Potvin, 2018; Thouin, 2017). Elles peuvent aussi être soutenues et renforcées par les interactions sociales de l'élève (Renouard et Mazabraud, 2018) ou par ses observations sensorielles (Potvin, 2018). Les conceptions intuitives des élèves ne sont pas non plus aléatoires ou futiles : elles paraissent rationnelles, organisées et valables pour l'apprenant. Potvin les décrit comme étant des « représentations mentales que les individus créent ou entretiennent à propos de ce que les choses sont ou de ce qu'elles font, pour les soutenir dans leur compréhension du monde » (Potvin, 2018, p. 240). Par opposition au savoir scientifique qui est surtout mobilisé en contexte scolaire, les conceptions intuitives font partie d'un système d'explications plus personnel qui est évoqué spontanément à travers les différentes activités quotidiennes de l'élève (Legendre, 2007).

Cependant, bien que les conceptions intuitives puissent s'avérer suffisamment efficaces dans certains contextes du quotidien de l'enfant, elles représentent souvent un obstacle pour l'enseignement des sciences puisqu'elles interfèrent avec les concepts scientifiques (Legendre, 2007; Potvin, 2018; Thouin, 2017). Effectivement, les nouveaux apprentissages prennent généralement appui sur les connaissances antérieures de l'élève. Or, si les connaissances antérieures de l'élève sont en fait des conceptions intuitives qui s'avèrent erronées dans certains contextes scientifiques, cela génère une incohérence, voire un écart,

entre les connaissances que les élèves ont élaborées à partir de leurs expériences quotidiennes, de leurs observations et de leurs intuitions et le savoir scolaire qui leur est enseigné à l'école (Legendre, 2007).

En outre, depuis quelques années, les résultats de recherche suggèrent que deux systèmes de pensée pourraient coexister chez un même individu : un système plus intuitif et un système plus analytique (Bago et De Neys, 2019; Evans, 2011, 2018; Evans et Stanovich, 2013; Kahneman, 2011). Les conceptions intuitives pourraient ainsi persister même après que les élèves ont reçu un enseignement formel des véritables concepts scientifiques, que ce soit au préscolaire, au primaire ou au secondaire (Potvin et Cyr, 2017). Également, puisque les conceptions intuitives des élèves sont renforcées à maintes occasions, les réseaux de neurones qui les supportent peuvent devenir robustes et résistants (Masson et Brault Foisy, 2014). Cela pourrait expliquer pourquoi les conceptions intuitives sont tenaces et vont même jusqu'à résister à l'enseignement (Potvin, 2018). Il semblerait également que ces conceptions soient parfois résistantes au point de persister à l'âge adulte, et ce, même chez des scientifiques détenant un niveau d'expertise très élevé (Allaire-Duquette *et al.*, 2021). D'un point de vue pédagogique, cela laisse présager que les enseignants de sciences ont une double tâche : ils doivent non seulement aider leurs élèves à apprendre de nouveaux concepts scientifiques, mais également les aider à résister à leurs conceptions intuitives pour parvenir à raisonner correctement dans certains contextes précis (Legendre, 2007; Vosniadou *et al.*, 2018).

1.4 Contrôle inhibiteur et expertise en sciences

Au cours des deux dernières décennies, de nouveaux outils méthodologiques, issues des neurosciences et de la psychologie cognitive, ont été utilisés pour étudier le changement conceptuel, permettant ainsi de caractériser de façon plus précise les processus cognitifs et cérébraux qui sous-tendent les apprentissages, notamment en sciences. Ainsi, il est maintenant possible de s'intéresser aux apprentissages difficiles à l'aide d'un niveau d'analyse supplémentaire, c'est-à-dire en observant les processus cognitifs et cérébraux à l'œuvre (Houdé, 2018; Masson, 2020; Masson et Brault Foisy, 2014; Masson et Borst, 2017). Plusieurs organisations internationales (ODCE, 2002, 2007, 2008; UNESCO, 2021b) ainsi que de nombreux chercheurs de la communauté scientifique (Ansari *et al.*, 2011; Houdé *et al.*, 2011; Masson et Borst, 2017) considèrent en ce sens qu'une meilleure compréhension des processus d'apprentissage est susceptible d'apporter des pistes de réflexion supplémentaires pour mieux enseigner.

Un élément fondamental qui ressort de ces recherches concerne le rôle central que joue le contrôle inhibiteur pour différents apprentissages contre-intuitifs (Houdé *et al.*, 2000). Le contrôle inhibiteur, qui fait partie des fonctions exécutives et qui siège dans le cortex préfrontal du cerveau, se définit comme la capacité à résister aux réponses mentales ou motrices dominantes, habituelles, automatiques ou intuitives (Diamond, 2013; Miyake et Friedman, 2012). Ce processus cognitif permet ensuite de sélectionner et de mobiliser une explication valide ou une stratégie appropriée, mais dont l'utilisation est moins automatique ou moins spontanée (Houdé et Borst, 2015; Mostofsky et Simmonds, 2008; Vosniadou *et al.*, 2018).

Le rôle du contrôle inhibiteur a été observé pour plusieurs domaines liés à des disciplines scolaires, comme le raisonnement mathématique (Babai *et al.*, 2014; Houdé *et al.*, 2011; Shtulman et Valcarcel, 2012; Stavy et Babai, 2010), le raisonnement logique (Houdé et Borst, 2015), l'arithmétique (Espy *et al.*, 2004), la grammaire (Lanöe *et al.*, 2016; Lubin *et al.*, 2012) et la lecture (Borst *et al.*, 2015; Brault Foisy *et al.*, 2017). En fait, la mobilisation du contrôle inhibiteur s'observe dans la réalisation de nombreuses tâches scolaires contre-intuitives, c'est-à-dire dans les tâches qui demandent à l'élève de résister à une conception ou à une stratégie intuitive pour parvenir à répondre correctement. Par exemple, en mathématiques, un élève qui compare deux fractions pourrait avoir tendance à dire que celle qui contient les plus grands chiffres est automatiquement la plus grande, ce qui n'est pas nécessairement vrai, surtout si les deux fractions n'ont pas le même dénominateur (ex. $1/3$ et $1/4$). Cette tendance peut être expliquée par le fait que, dès son jeune âge, l'enfant apprend à comparer des nombres naturels en observant à maintes reprises que plus un nombre est grand, plus la quantité qu'il représente est grande également. Dans un problème impliquant de comparer des fractions, l'élève doit ainsi résister à l'intuition « plus grand nombre, plus grande quantité » (Obersteiner *et al.*, 2013).

Bien que son rôle soit important au regard de différents apprentissages touchant des disciplines scolaires variées, il est admis que son rôle est particulièrement important en ce qui a trait aux apprentissages en sciences, et ce, pour l'ensemble des disciplines scientifiques : en chimie (Malenfant-Robichaud, 2018), en astronomie (Murphy et Alexander, 2008; Wandersee *et al.*, 1994), en biologie (Babai *et al.*, 2010; Opfer et Siegler, 2004), en physique (Brault Foisy *et al.*, 2015; Potvin *et al.*, 2015), en cinématique (Lin *et al.*, 2023) et en électricité (Masson *et al.*, 2014). Des recherches utilisant l'imagerie cérébrale ont montré que les individus ayant des difficultés conceptuelles en sciences sous-activent les régions préfrontales de leur cerveau liées à la mobilisation du contrôle inhibiteur (Allaire-Duquette *et al.*, 2019; Brault Foisy *et al.*, 2015; Dunbar *et al.*, 2007; Masson *et al.*, 2014). Par exemple, Allaire-Duquette et ses collaborateurs (2019) ont

comparé deux groupes d'élèves du secondaire ayant des niveaux de compétence différents en sciences. Ils ont observé que le groupe qui réussissait mieux en sciences était celui dont les élèves activaient davantage les régions préfrontales de leur cerveau afin d'inhiber leurs conceptions intuitives. D'autres recherches, utilisant cette fois les temps de réponse, ont mis en évidence que les participants de tous les âges répondaient plus lentement et étaient moins précis lorsqu'ils devaient inhiber une conception intuitive pour mobiliser une explication scientifique (Potvin *et al.*, 2015). Ainsi, les chercheurs combinent souvent des données cérébrales et comportementales pour inférer sa mobilisation (Brault Foisy *et al.*, 2017). En effet, sur le plan cérébral, la mobilisation du contrôle inhibiteur se traduit par une activation de certaines régions cérébrales, telles que le cortex préfrontal ventrolatéral, le cortex préfrontal dorsolatéral et le cortex cingulaire antérieur (Fuster, 2015). Au niveau comportemental, des temps de réponse plus élevés lors de tâches contre-intuitives peuvent également être révélateurs du recours au contrôle inhibiteur (Kelemen et Rosset, 2009; Shtulman et Valcarcel, 2012). Les résultats de ces recherches en didactique des sciences montrent que le contrôle inhibiteur joue un rôle clé pour parvenir à résister à des conceptions intuitives afin de réussir à mobiliser une explication scientifique.

Un autre élément important à mentionner est que la persistance de certaines conceptions intuitives dans le temps peut faire en sorte que même les adultes doivent les inhiber durant toute leur vie (Shultman et Harrington, 2015). Skelling-Desmeules et ses collaborateurs (2021) ont en ce sens montré que même dans le cas d'un concept scientifique aussi simple que la distinction entre le vivant et le non-vivant, les adultes doivent mobiliser leur contrôle inhibiteur pour résister à la conception intuitive « ce qui bouge est nécessairement vivant ». Dans le même ordre d'idées, Allaire-Duquette et ses collègues (2021) ont mis en évidence que même les titulaires d'un doctorat en physique étaient plus lents, moins précis et activaient davantage les régions frontales de leur cerveau lorsqu'ils devaient évaluer la validité d'idées naïves relatives à la physique et à la biologie. Il semblerait donc que la mobilisation du contrôle inhibiteur puisse demeurer nécessaire même chez des scientifiques de haut niveau qui doivent encore résister à des conceptions intuitives pour être en mesure de répondre correctement.

En somme, les résultats des recherches abordées précédemment établissent de façon empirique le rôle central du contrôle inhibiteur qui apparaît comme un mécanisme clé de l'apprentissage dans plusieurs domaines et matières scolaires et plus particulièrement en sciences (Allaire-Duquette *et al.*, 2019; Brault Foisy *et al.*, 2015; Potvin *et al.*, 2015; Vosniadou *et al.*, 2018a). De surcroît, d'autres résultats ont montré que le recours au contrôle inhibiteur pour résister à des conceptions intuitives est nécessaire même à l'âge

adulte (Allaire-Duquette *et al.*, 2021; Shutlman et Harrington, 2015; Skelling-Desmeules *et al.*, 2021). Toutefois, les recherches les plus récentes sur ce sujet soulèvent des questionnements en ce qui concerne la mobilisation du contrôle inhibiteur qui semble être influencée par certaines variables (Brault Foisy *et al.*, 2021; Brault Foisy *et al.*, en révision; Potvin et Cyr, 2017). En effet, certaines études suggèrent qu'une mobilisation plus importante du contrôle inhibiteur serait nécessaire pour résister à certaines conceptions intuitives (Brault Foisy *et al.*, 2021; Brault Foisy *et al.*, en révision). Parallèlement, certains concepts scientifiques semblent aussi être plus difficiles, ce qui est aussi susceptible d'avoir une incidence sur la mobilisation du contrôle inhibiteur.

Quelques hypothèses ont en ce sens été suggérées pour tenter d'expliquer ce qui pourrait influencer la mobilisation du contrôle inhibiteur au regard des différentes conceptions intuitives à inhiber. D'abord, Brookman-Byrne et ses collègues (2014) mentionnent que les origines variées des conceptions ont peut-être un effet sur le contrôle inhibiteur. Skelling-Desmeules et ses collaborateurs (2021) suggèrent que des caractéristiques concernant les différentes conceptions intuitives, telles que leurs origines et la fréquence à laquelle elles sont renforcées, pourraient influencer le contrôle inhibiteur. Potvin et Cyr (2017) avancent l'idée que l'âge de l'apprenant et, par conséquent, son niveau de développement et d'éducation scientifique sont des variables qui semblent également influencer le contrôle inhibiteur. Effectivement, si l'apprenant a eu l'occasion de renforcer ses connaissances scientifiques, celles-ci seront davantage automatisées. Ce faisant, elles sont susceptibles de s'activer plus facilement. Par exemple, dans le cas de la conception intuitive celle selon laquelle « ce qui est lourd coule davantage », il semblerait qu'un niveau élevé d'éducation scientifique puisse contribuer à rendre la mobilisation du contrôle inhibiteur moins importante (Brault Foisy *et al.*, 2021; Potvin et Cyr, 2017).

Toutefois, en ce qui a trait à la conception intuitive « ce qui bouge est vivant », la mobilisation du contrôle inhibiteur nécessaire pour y résister demeure stable en dépit de l'âge et de l'éducation scientifique (Brault Foisy *et al.*, en révision). Ceci peut paraître surprenant, considérant que la distinction entre le vivant et le non-vivant est un apprentissage scientifique que les enfants réalisent tôt dans leur parcours scolaire (TIMSS Encyclopedia, 2015). Aussi, sur le plan conceptuel, la distinction entre le vivant et le non-vivant apparaît moins complexe que le concept de flottabilité et, malgré cela, la mobilisation du contrôle inhibiteur demeure tout aussi importante au fil du temps pour la conception intuitive « ce qui bouge est vivant », tandis qu'elle diminue dans le cas de la conception « ce qui est lourd coule davantage ». D'autres études s'avèrent donc nécessaires afin de mieux cerner quelles variables didactiques, c'est-à-dire les

variables directement liées aux contenus d'apprentissage, sont susceptibles d'influencer la mobilisation du contrôle inhibiteur au regard de différents contenus scientifiques. C'est précisément à ce besoin que souhaite répondre ce projet de recherche qui s'intéresse à l'influence de différentes variables didactiques, liées aux conceptions intuitives et aux concepts scientifiques, sur la mobilisation du contrôle inhibiteur pour différents contenus scientifiques.

1.5 Question de recherche

Considérant que la culture scientifique revêt une importance capitale et que les sciences occupent une place centrale dans la prise de décision quotidienne, l'apprentissage des sciences s'avère être un enjeu important. Or, malgré sa place au sein des cursus scolaires, les élèves rencontrent des difficultés persistantes à développer une compréhension satisfaisante de plusieurs concepts scientifiques. Bien que ces difficultés et erreurs fréquentes puissent être expliquées par de nombreux facteurs, des résultats de recherche mettent en lumière que les difficultés conceptuelles en sciences seraient en partie attribuables à certaines caractéristiques particulières aux sciences.

D'une part, les élèves entretiennent souvent diverses conceptions intuitives à propos des phénomènes scientifiques qui les entourent (diSessa, 2014). L'adhésion à ces conceptions intuitives est répandue et celles-ci se construisent tôt dans la vie de l'enfant (Thouin, 2017). L'existence des conceptions intuitives fréquentes a été largement documentée par la recherche (diSessa, 2014; Potvin *et al.*, 2020). Malgré cela, ces conceptions intuitives demeurent un obstacle important dans la compréhension de plusieurs concepts scientifiques (Carey, 2000), car elles sont persistantes à travers le temps et résistantes aux efforts des enseignants de sciences (Potvin, 2018).

D'autre part, plusieurs travaux de recherche ont mis en évidence le rôle central du contrôle inhibiteur dans le raisonnement scientifique puisqu'il s'agit du mécanisme qui permet de résister aux conceptions intuitives (Allaire-Duquette *et al.*, 2019; Brault Foisy *et al.*, 2015; Masson *et al.*, 2014). D'autres travaux montrent que le recours au contrôle inhibiteur persiste à l'âge adulte, et ce, même pour les scientifiques considérés experts (Allaire-Duquette *et al.*, 2021; Shtulman et Harrington, 2015). Or, de récents résultats de recherche arrivent à la conclusion que la mobilisation du contrôle inhibiteur fluctuerait selon différentes variables qui n'ont pas encore été identifiées formellement. Certaines pistes ont été évoquées par des chercheurs, comme la nature du contenu scientifique abordé, la nature de la conception à laquelle il faut résister, l'âge des élèves et leur niveau d'éducation scientifique (Brault Foisy *et al.*, 2021; Brault Foisy

et al., en révision; Potvin et Cyr, 2017; Skelling-Desmeules *et al.*, 2021). Il apparaît dès lors pertinent de tenter d'identifier ces variables didactiques, c'est-à-dire les variables liées au contenu d'apprentissage, ainsi que la manière dont elles interagissent entre elles, ce qui ne semble jamais avoir été fait.

Qui plus est, la plupart des recherches portant sur le contrôle inhibiteur dans le contexte de l'apprentissage des sciences ont été réalisées auprès d'élèves du secondaire ou auprès d'adultes (pour une revue, voir Mason et Zocolletti, 2021). La présente recherche se penche sur les élèves du primaire, plus précisément ceux du 3^e cycle. Il a été démontré que les enfants de cet âge entretiennent plusieurs conceptions intuitives (Potvin et Cyr, 2017; Vosniadou *et al.*, 2018a; Wilkinson *et al.*, 2019), tout en étant capables d'inhiber lorsque cela est nécessaire (Brault Foisy *et al.*, en révision). Également, ces élèves ont reçu un début d'enseignement formel touchant différents concepts scientifiques (TIMSS Encyclopedia, 2015), ce qui devrait leur permettre d'avoir suffisamment de connaissances pour mobiliser des concepts scientifiques variés. L'âge des élèves de 5^e année correspond aussi au début de l'apprentissage de concepts scientifiques plus abstraits (Mason *et al.*, 2019), ce qui permet d'étudier les variables qui influencent le contrôle inhibiteur au regard d'une plus grande variété de concepts qu'avec des élèves plus jeunes. Enfin, comme les élèves au primaire ont majoritairement un niveau d'intérêt élevé envers les sciences (Mullis *et al.*, 2020), le manque d'intérêt ne devrait pas interférer dans la réalisation de la tâche.

La question à laquelle cette recherche tente de répondre est donc la suivante : quelles sont les variables didactiques pouvant influencer la mobilisation du contrôle inhibiteur lors de l'apprentissage de concepts scientifiques au primaire auxquels sont associées des conceptions intuitives fréquentes ?

Sur le plan scientifique, le fait d'identifier et d'observer comment interagissent certaines variables didactiques sur le contrôle inhibiteur pourrait permettre une meilleure compréhension de ce qui caractérise le recours au contrôle inhibiteur et de ce qui influence les difficultés conceptuelles des élèves en sciences. À ce sujet, Potvin et Cyr (2017) croient qu'il serait possible de parvenir à développer un modèle qui pourrait caractériser plus systématiquement la mobilisation du contrôle inhibiteur pour différents contenus scientifiques associés à différentes conceptions intuitives fréquentes, ce qui éviterait que les chercheurs continuent à expérimenter l'évolution de chaque conception, une à la fois. Une meilleure compréhension de l'influence qu'ont certaines variables sur le contrôle inhibiteur pourrait en ce sens permettre d'amorcer une première classification des conceptions intuitives au regard de ces variables, ce qui n'a encore jamais été fait. Ces éléments seraient alors susceptibles d'alimenter une réflexion quant à

la priorisation des efforts d'enseignement visant à faciliter l'apprentissage de concepts scientifiques contre-intuitifs. Par exemple, si l'apprentissage d'un concept scientifique nécessite une plus grande mobilisation du contrôle inhibiteur pour résister à une conception intuitive tenace, il pourrait être pertinent de tenter d'aborder ce contenu en début de parcours scolaire.

Sur le plan social, bien que cette recherche soit de nature plus fondamentale, l'amélioration des pratiques professionnelles des enseignants en sciences, ainsi que la réussite des élèves en sciences, n'en demeure pas moins centrale. Les enseignants pourront bénéficier des résultats de ce projet, car ceux-ci seront susceptibles de mieux comprendre l'origine des difficultés conceptuelles de leurs élèves, tant au niveau didactique (conception intuitive) qu'au niveau des processus cognitifs (contrôle inhibiteur), et ce, dans la perspective de mieux prévenir les difficultés de leurs élèves et de bonifier leurs pratiques pédagogiques. Carey (2000) met d'ailleurs en lumière l'importance pour les enseignants d'inclure les conceptions intuitives dans leurs préoccupations pédagogiques en informant leurs élèves de leur existence pratiquement inévitable.

En ce sens, des travaux de recherche ont mis en évidence qu'enseigner de nouveaux concepts scientifiques n'est pas suffisant en soi pour que les élèves réussissent; il faudrait parallèlement leur enseigner à inhiber leurs conceptions intuitives (Vosniadou *et al.*, 2018a). Le fait de mieux caractériser le contrôle inhibiteur au regard de différentes variables pourrait aider à préciser cette idée. Des approches pédagogiques visant à faciliter la mobilisation du contrôle inhibiteur pourraient également être envisagées en sciences (Allaire-Duquette *et al.*, 2019; Potvin et Cyr, 2017), tel que le suggèrent déjà des études concernant des apprentissages en mathématiques (Houdé *et al.*, 2000, 2001, 2011). Ces recherches portant sur l'enseignement du contrôle inhibiteur sont récentes et leurs résultats, bien que préliminaires (voir par ex. Delalande *et al.*, 2020; Letang *et al.*, 2020; Wilkinson *et al.*, 2019), suscitent l'intérêt de la communauté scientifique. Ce genre d'approche visant à aider les élèves à mobiliser leur contrôle inhibiteur, combiné à une priorisation des efforts d'enseignement en lien avec les variables qui influencent sa mobilisation, est novatrice et pourrait être prometteuse pour les milieux d'enseignement. Les résultats de ce projet pourraient ainsi contribuer à enrichir cette piste d'intervention pédagogique, en plus de pouvoir s'insérer dans des projets de développement professionnel ou faire l'objet de formations continues destinées aux enseignants, ce qui est documenté comme étant une pratique efficace pour améliorer l'enseignement des sciences (Gauthier *et al.*, 2007). Finalement, une amélioration des pratiques professionnelles relatives à l'enseignement des sciences pourrait éventuellement avoir une incidence positive sur la réussite des

élèves en sciences et sur leur sentiment de compétence qui est lié à la persévérance et à la réussite éducative (OCDE, 2008).

CHAPITRE 2

CADRE THÉORIQUE

Le deuxième chapitre de ce mémoire se sépare en deux grandes parties : 1- le contrôle inhibiteur et 2- les variables didactiques susceptibles d'influencer sa mobilisation. D'abord, dans la première partie, des modèles et des définitions des fonctions exécutives et du contrôle inhibiteur seront présentés et discutés. Ensuite, une recension des écrits faisant le lien entre le contrôle inhibiteur et les apprentissages scientifiques au primaire sera exposée. Dans la deuxième partie, une recension des écrits permettra de dégager l'influence de deux variables didactiques sur la mobilisation du contrôle inhibiteur, soit la *familiarité* des conceptions intuitives et la *complexité* des concepts scientifiques. Enfin, ce chapitre se terminera par la formulation des hypothèses de recherche qui émergent à la lumière des appuis théoriques.

2.1 Contrôle inhibiteur

Cette première partie du cadre théorique définira ce que sont les fonctions exécutives et les raisons pour lesquelles leur développement suscite l'intérêt des chercheurs en éducation. Le contrôle inhibiteur, qui est l'une des principales fonctions exécutives, sera également défini à la lumière de différentes recherches. Les modèles et les théories sur lesquels cette recherche prendra appui seront présentés, de même que les principales méthodes permettant de mesurer le contrôle inhibiteur. Enfin, le rôle du contrôle inhibiteur au regard des apprentissages scientifiques sera discuté à la lumière d'une recension des écrits.

2.1.1 Fonctions exécutives et contrôle inhibiteur : modèles et définitions

L'intérêt pour les fonctions exécutives en sciences de l'éducation est assez récent, comme en témoigne l'absence de termes relatifs aux fonctions exécutives dans les dictionnaires spécialisés en éducation (Henriot-van Zanten et Rayou, 2017; Legendre, 2005; Raynal et Rieunier, 2014). Pour comprendre ce que sont les fonctions exécutives et les raisons pour lesquelles elles sont dignes d'intérêt en éducation, il est nécessaire de consulter les travaux de recherche menés en psychologie cognitive, en neuropsychologie et en neurosciences. Ces domaines de recherche tentent de comprendre et de définir les fonctions exécutives depuis plusieurs années, si bien que déjà, en 1996, Eslinger dénombrait 33 définitions de ce que sont les fonctions exécutives (Eslinger, 1996). De manière globale, les fonctions exécutives sont des processus généraux (Miyake et Friedman, 2012) qui peuvent être synonymes de contrôle cognitif

(Diamond, 2013) et qui sont associées au lobe frontal de cerveau (Miyake *et al.*, 2000). Plus spécifiquement, les fonctions exécutives peuvent être définies comme un ensemble de processus de contrôle de haut niveau qui régulent les pensées et les comportements d'une personne pour atteindre un objectif (Miyake et Friedman, 2012). Elles sont également impliquées dans la résolution de problèmes et la réalisation de tâches complexes (Friedman et Miyake, 2017). Ainsi, les fonctions exécutives s'opposent aux fonctions plus automatiques, telles que la reconnaissance visuelle ou auditive (Zeki, 1993), qui se font naturellement, sans effort ou contrôle volontaire.

Si la définition de ce que sont les fonctions exécutives semble aujourd'hui faire consensus au sein de la communauté scientifique, leur identification ne fait pas toujours l'unanimité. Plusieurs chercheurs ont tenté d'identifier et de caractériser les principales fonctions exécutives, mais il semblerait qu'il ne soit pas aisé de les distinguer les unes des autres, possiblement parce qu'elles interagissent généralement ensemble, ce qui fait en sorte qu'elles sont souvent corrélées entre elles au sein d'une même tâche (Miyake *et al.*, 2000). À ce propos, une difficulté persistante semble être de réussir à créer des tâches cognitives « pures », c'est-à-dire qui mesurent exclusivement une fonction exécutive (Friedman et Miyake, 2004, 2017; Shilling *et al.*, 2002). Néanmoins, il apparaît possible de pallier cette difficulté en utilisant plusieurs tâches pour mesurer une même fonction exécutive (Friedman et Miyake, 2017) et en utilisant des techniques d'analyse variées, allant au-delà des corrélations (Miyake *et al.*, 2000). En outre, certaines recherches mettent en lumière qu'il peut être encore plus difficile de distinguer les fonctions exécutives chez les jeunes enfants (Brydges *et al.*, 2014; Karr *et al.*, 2018; Wiebe *et al.*, 2011) que chez les adolescents ou les adultes, possiblement parce qu'elles ne sont pas encore pleinement développées. Ainsi, d'une recherche à l'autre, les termes « fonctions exécutives » peuvent faire référence à un nombre différent de fonctions.

D'abord, quelques modèles suggèrent qu'une seule fonction exécutive générale (*common EF*) existe, ou du moins, qu'il existe une base commune importante entre-elles (Miyake et Friedman, 2000). Par exemple, pour Duncan et son équipe (1996) qui ont étudié les patients atteints de lésions frontales, un mécanisme unificateur pourrait possiblement caractériser la nature des déficits rencontrés chez les patients. Dans un autre ordre d'idées, Valian (2015) suggère que l'inhibition serait en quelque sorte une composante commune à toutes les fonctions exécutives puisque toutes les tâches demandent d'inhiber des distracteurs. En outre, les résultats de recherches qui s'intéressent au développement des fonctions exécutives durant la petite enfance supportent parfois les modèles à une fonction exécutive (Willoughby

et al., 2012). Néanmoins, certaines recherches appuient la différenciation progressive des fonctions exécutives, et ce, dès l'âge préscolaire (Best et Miller, 2010). La méta-analyse de Karr et ses collaborateurs (2018) souligne que les fonctions exécutives passent de ce qui semble être une fonction unique à un ensemble de processus diversifiés et interactifs au fil du développement de l'enfant. Plusieurs études menées auprès d'enfants d'âge scolaire, d'adolescents et d'adultes appuient cette idée (Karr *et al.*, 2018).

Alors que certains modèles soutiennent l'existence d'une seule fonction exécutive, d'autres vont jusqu'à en identifier cinq : la planification, la mémoire de travail, la fluidité, l'inhibition et la flexibilité (Packwood *et al.*, 2011). Quelques recherches se distinguent des autres, notamment en suggérant que la mémoire implique en fait deux fonctions : la mémoire verbale et la mémoire spatiale (Fournier-Vicente *et al.*, 2008). Fisk et Sharp (2004) séparent aussi la mémoire en deux fonctions, en suggérant que l'accès à la mémoire à long terme puisse être une fonction exécutive au même titre que l'est la mémoire de travail (Fisk et Sharp, 2004). La question à savoir si l'attention sélective (ou l'attention exécutive) est une fonction exécutive ou non revient aussi souvent dans les écrits, notamment dans le contexte de recherches menées en neuropsychologie portant sur le déficit de l'attention (Makris *et al.*, 2007).

Malgré ces divergences quant à l'identification des fonctions exécutives, notamment chez les enfants en bas âge, la majorité des études appuient l'existence de trois fonctions exécutives qui seraient distinctes les unes des autres : la mémoire de travail, l'inhibition et la flexibilité cognitive (Friedman et Miyake, 2017; Miyake *et al.*, 2000; Miyake et Friedman, 2012). L'analyse factorielle confirmatoire menée par Miyake et ses collaborateurs (2000) met en lumière que bien que les fonctions exécutives (mémoire de travail, inhibition et flexibilité cognitive) soient modérément corrélées entre elles, elles sont tout de même séparables (*interrelated but separable*) et il est possible de les distinguer les unes des autres. De surcroît, leurs résultats suggèrent que les trois fonctions exécutives qu'ils identifient contribuent de manière différente à la performance dans des tâches complexes. Enfin, il importe de mentionner que ces trois fonctions exécutives principales, en plus d'avoir fait l'objet de plusieurs études importantes menées par Miyake, Friedman et leurs collaborateurs au cours des deux dernières décennies, semblent également liées à la performance dans les tâches scolaires (Baggetta et Alexander, 2016).

Un autre modèle des fonctions exécutives qui est souvent évoqué dans la littérature scientifique est celui de Diamond (2013). D'une part, ce modèle met au premier plan deux fonctions exécutives qui semblent récurrentes dans les écrits scientifiques : la mémoire de travail et le contrôle inhibiteur. D'autre part, la

flexibilité cognitive, une troisième fonction exécutive, occupe également une place importante dans ce modèle puisqu'elle découle de la mémoire de travail et du contrôle inhibiteur. Dans son modèle, Diamond (2013) définit la mémoire de travail comme étant « la capacité à conserver une information à l'esprit et à la manipuler mentalement » (Diamond, 2013, p. 137, traduction libre). Ensuite, elle décrit le contrôle inhibiteur comme « une des principales fonctions exécutives qui implique la capacité de contrôler son attention, son comportement, ses pensées et/ou ses émotions pour outrepasser une forte prédisposition interne ou un attrait externe dans le but de faire ce qui est plus approprié ou demandé » (Diamond, 2013, p. 136, traduction libre). En outre, Diamond (2013) établit des liens importants entre le contrôle inhibiteur et la mémoire de travail puisque ces deux fonctions sont souvent appelées à œuvrer de concert. Par exemple, la mémoire de travail pourrait être impliquée lorsqu'une personne doit maintenir un objectif en tête, pendant que le contrôle inhibiteur permet de réduire l'interférence posée par les distracteurs pour atteindre l'objectif. Il importe également d'ajouter que pour Diamond (2013), la fonction exécutive qu'est le contrôle inhibiteur inclut en fait trois composantes : l'attention sélective, le contrôle de soi et l'inhibition cognitive. L'attention sélective permet de diriger son attention sur ce qui est le plus important, par exemple, sur la voix de l'enseignant dans une salle de classe bruyante. Le contrôle de soi est un mécanisme qui permet de contrôler ses comportements et ses émotions. Il peut être associé à la discipline personnelle. L'inhibition cognitive est un processus qui agit au niveau de la pensée, des idées et des souvenirs, en inhibant ce qui n'est pas utile ou pertinent. Cette composante du contrôle inhibiteur permet aussi de résister aux interférences. D'autres chercheurs soutiennent aussi que la fonction exécutive qu'est le contrôle inhibiteur se décline en plus d'une composante (Dempster, 1993; Gärtner et Strobel, 2021; Friedman et Miyake, 2004; Harnishfeger, 1995; Nigg, 2000).

Les fonctions exécutives sont associées au cortex préfrontal du cerveau, une région cérébrale qui se développe beaucoup plus lentement que d'autres régions (Casey *et al.*, 2005). Par exemple, dès la naissance, le cortex auditif et le cortex visuel se développent rapidement, de sorte qu'ils sont pleinement fonctionnels dès la petite enfance (Gogtay *et al.*, 2004; Huttenlocher et Dabholkar, 1997). Le cortex préfrontal, pour sa part, commence lui aussi à se développer dès la naissance, en passant à travers un processus de synaptogénèse, d'élagage et de stabilisation, mais l'ensemble de ce processus exige une vingtaine d'années, ce qui fait en sorte que les fonctions exécutives arrivent à maturité seulement au début de l'âge adulte (Gogtay *et al.*, 2004; Huttenlocher et Dabholkar, 1997). La littérature scientifique met d'ailleurs en évidence l'importance de s'intéresser au développement des fonctions exécutives dès l'enfance, notamment parce qu'il existe des différences importantes entre les individus (Friedman et

Miyake, 2017), et ce, dès un jeune âge (Baum *et al.*, 2017). Ainsi, même si les fonctions exécutives suivent les mêmes schèmes de développement et sont supportées par les mêmes régions cérébrales chez tous les individus, il existe tout de même des différences individuelles, qui peuvent s'exprimer de différentes manières, tant au plan comportemental (par ex. : meilleure performance dans une tâche) qu'au plan cérébral (par ex. : plus forte connectivité entre les fonctions) (Friedman et Miyake, 2017).

De surcroît, un nombre important d'études mettent en évidence que l'efficacité des fonctions exécutives permettrait de prédire la réussite scolaire (Ahmed *et al.*, 2019; Bull et Lee, 2014; Gathercole *et al.*, 2004; Nguyen et Duncan, 2019) et même la réussite dans la vie de manière plus générale (Brown et Landgraf, 2010; Davis *et al.*, 2010; Diamond, 2013). Une étude popularisée sous le nom « Marshmallow Test » (Mischel, 1974; Mischel *et al.*, 1989) s'est intéressée à la capacité de l'enfant à se contrôler dès un jeune âge. Dans cette étude, l'enfant doit résister à une récompense : une guimauve déposée devant lui. L'expérimentateur explique à l'enfant que lorsque celui-ci sortira de la pièce, l'enfant pourra manger la guimauve immédiatement. Par contre, s'il réussit à patienter durant 15 minutes, l'expérimentateur lui donnera une deuxième guimauve à son retour. Cette expérimentation simple portant sur le délai de gratification chez les enfants montre que dès l'âge de 4 ans, le tiers des enfants est capable d'attendre le temps demandé. Cette étude est l'une des premières à avoir suggéré que la capacité à résister à une gratification immédiate pouvait être associée à la réussite dans un sens plus large et surtout, à plus long terme. Effectivement, une fois devenus adultes, les enfants qui avaient réussi à patienter davantage semblaient mieux réussir sur plusieurs plans. Par ailleurs, il importe de mentionner que certains chercheurs ont tenté de répliquer les résultats de cette étude et sont arrivés à des résultats moins intéressants (par ex. : Watts *et al.*, 2018), tandis qu'à l'opposé, d'autres sont parvenus à des résultats similaires. Par exemple, Friedman et ses collègues (2011) ont mis en évidence qu'un meilleur contrôle de soi durant la petite enfance est corrélé avec un contrôle inhibiteur et une mémoire de travail plus efficaces à l'âge de 17 ans.

Une autre étude importante qui abonde en ce sens est celle de Moffitt et ses collaborateurs (2011). Ces chercheurs ont suivi une cohorte de 1000 enfants de la naissance jusqu'à l'âge de 32 ans et ont montré qu'un bon niveau de contrôle de soi (« *self-control* ») durant l'enfance (3-11 ans) permet de prédire la réussite scolaire à l'adolescence, ainsi que la réussite à l'âge adulte sur plusieurs plans, incluant même la santé physique, la dépendance aux substances et les finances personnelles (Moffitt *et al.*, 2011). Ces résultats ont également été obtenus pour des enfants grandissant au sein d'un même environnement

familial : l'enfant qui avait un contrôle de soi plus faible que ses frères et/ou ses sœurs durant l'enfance avait de moins bons résultats scolaires que ceux-ci. En somme, les fonctions exécutives permettent non seulement de prédire la réussite scolaire, mais également la réussite dans presque tous les aspects de la vie, et ce, plusieurs années plus tard (Diamond, 2013). Elles permettraient même de prédire une meilleure qualité de vie (Brown et Landgraf, 2010; Davis *et al.*, 2010).

Plusieurs chercheurs mettent donc de l'avant l'idée que des interventions portant sur le contrôle de soi pourraient contribuer à réduire les coûts sociétaux, faire économiser de l'argent aux contribuables et favoriser la prospérité économique (Duncan *et al.*, 2007; Moffitt *et al.*, 2011). Dans un même ordre d'idées, comme les fonctions exécutives semblent fondamentales dans l'apprentissage et la réussite, il apparaît pertinent de vouloir développer des programmes permettant de soutenir le développement des fonctions exécutives (Diamond, 2013). Certains chercheurs ont en ce sens tenté, en laboratoire, de mener des programmes intensifs d'entraînement des fonctions exécutives, mais il semble que bien que ces entraînements puissent connaître un certain succès dans des tâches précises en laboratoire (Olesen *et al.*, 2004), les résultats de ces entraînements demeurent à ce jour difficilement transférables à des contextes réels et plus lointains, comme les apprentissages scolaires (Hitchcock et Westwell, 2017; Karbach et Kray, 2009; Sala et Gobet, 2017). Néanmoins, le développement des fonctions exécutives continue de susciter l'intérêt de la communauté scientifique puisqu'une meilleure connaissance de leur fonctionnement pourrait avoir une incidence importante sur notre compréhension des processus liés à l'apprentissage.

Parmi les fonctions exécutives, le contrôle inhibiteur suscite particulièrement l'attention des chercheurs, non seulement en psychologie cognitive, mais également en éducation. Les travaux des dernières années, dont ceux d'Houdé et de ses collaborateurs, ont contribué à mieux définir le rôle crucial de cette fonction exécutive dans l'apprentissage (Borst *et al.*, 2013b, Cassotti *et al.*, 2016; Houdé, 2011, 2016; Houdé et Guichard, 2001; Houdé *et al.*, 2000, 2011; Lubin *et al.*, 2012; Roëll *et al.*, 2019; Rossi *et al.*, 2012, 2019; Viarouge *et al.*, 2019). Dans les recherches, les termes « contrôle inhibiteur » et « inhibition » sont souvent utilisés de manière équivalente pour référer à la fonction exécutive qui implique de résister à des interférences. Par ailleurs, dans le langage commun, le terme inhibition peut avoir une connotation plus négative, car il peut être associé à l'idée de restriction. Également, dans certaines approches théoriques, dont la psychanalyse, l'inhibition est décrite comme un symptôme ou une pathologie (Freud, 1936). En éducation, la définition de Legendre (2005) abonde aussi en ce sens en définissant l'inhibition comme un état de blocage d'origine affective. Dans le contexte de cette recherche, le terme « contrôle inhibiteur »

sera donc privilégié pour éviter la connotation négative qui peut être associée au mot « inhibition ». En outre, dans sa théorie de l'inhibition cognitive, Houdé (2014) définit le contrôle inhibiteur comme un mécanisme central qui permet de « résister ». Le contrôle inhibiteur « opère également sur toutes nos réponses comportementales comme un signal 'stop' qui permet à notre organisme d'attendre avant d'agir, de prendre une décision ou de donner une réponse. Il permet de contrôler notre impulsivité, nos comportements, nos émotions et nos actions » (Houdé, 2019a, p. 184). Il importe de mentionner que dans certains de ses ouvrages, Houdé positionne cette idée de résistance dans un contexte très large, incluant la résistance sociopolitique, militante et militaire (Houdé, 2014, 2020; Houdé et Borst, 2018). Dans le cadre de cette recherche, le contrôle inhibiteur fera référence exclusivement au processus de contrôle cognitif qui permet de résister à des conceptions rapides, spontanées ou intuitives dans le but d'ensuite sélectionner et mobiliser le concept scientifique adéquat.

Une recherche importante portant sur le rôle du contrôle inhibiteur au regard des apprentissages scolaires est celle d'Houdé et ses collaborateurs (Houdé *et al.*, 2011). Ces chercheurs qui ont principalement tenté de caractériser le contrôle inhibiteur au regard des apprentissages logicomathématiques. Pour ce faire, ils ont présenté à plusieurs enfants l'une des tâches clés de la théorie constructiviste des stades de développement élaborée par Piaget : la tâche de conservation du nombre (Piaget et Inhelder, 1966). Dans cette tâche piagétienne classique, l'enfant voit deux rangées qui comportent chacune un nombre identique de jetons. Toutefois, les jetons de l'une des deux rangées sont plus espacés, ce qui donne l'impression à l'enfant qu'il y en a plus. Pour Piaget, les enfants qui comprennent que les deux rangées contiennent le même nombre de jetons sont à un stade plus avancé de leur développement, soit le stade opératoire. Houdé et ses collègues ont donc demandé à des enfants de 5-6 ans et de 9-10 ans d'accomplir la tâche de conservation du nombre, pendant qu'un appareil d'imagerie cérébrale fonctionnelle prenait des images de leur cerveau. Houdé et ses collègues ont observé que ce qui distinguait les enfants de 9-10 qui répondaient correctement est qu'ils activaient les régions préfrontales de leur cerveau, soit les régions associées au contrôle inhibiteur. Les enfants de 5-6 ans, qui ont tendance à échouer la tâche de Piaget, n'activent pas ces régions. En fait, ils n'arrivent pas à inhiber l'intuition suggérant que « longueur plus grande = nombre plus grand ». Il semblerait que la réussite ou de l'échec répété de l'enfant face à certaines tâches piagésiennes seraient en fait lié à une mobilisation plus ou moins efficace du contrôle inhibiteur plutôt qu'à des stades de développement « fixes » comme le suggérait Piaget (1929, 1966) (Houdé *et al.*, 2011; Houdé et Borst, 2015).

À la suite de cette étude, Houdé et ses collaborateurs ont repris différentes tâches piagétienne afin de mettre en évidence l'importance du contrôle inhibiteur dans différents apprentissages logicomathématiques (Houdé et Borst, 2015). En fait, pour Houdé et ses collègues, le contrôle inhibiteur peut expliquer la réussite d'un ensemble de tâches logicomathématiques impliquant non seulement la conservation du nombre, mais aussi la permanence de l'objet et la catégorisation (Houdé, 2014, 2018, 2020; Houdé *et al.*, 2000; Houdé et Borst, 2018). Houdé postule en ce sens que le développement de l'enfant et de l'intelligence pourrait se résumer à apprendre à inhiber, c'est-à-dire à résister aux nombreux automatismes qu'il porte en lui (Houdé, 2014; 2020). D'autres travaux portant sur le contrôle inhibiteur ont permis de démontrer empiriquement son rôle important dans plusieurs disciplines scolaires, dont l'arithmétique (Lubin *et al.*, 2013), la grammaire (Lanoë *et al.*, 2016) et la lecture (Borst *et al.*, 2015; Brault Foisy *et al.*, 2017).

En outre, d'autres recherches ont mis en évidence que le jeune enfant dispose en fait d'une grande variété de stratégies cognitives. Siegler (1996) propose à cet égard un modèle appelé « *Overlapping wave theory* » dans lequel il met en évidence, entre autres, que certaines stratégies peuvent entrer en compétition les unes avec les autres sur de grandes périodes. Ce modèle de développement dans lequel les stratégies de l'enfant sont présentées comme « des vagues qui se chevauchent » a été appuyé par d'autres recherches portant sur le développement cognitif de l'enfant (Chen et Siegler, 2000; van der Ven *et al.*, 2012). Il semble donc que l'enfant apprend et mobilise différentes stratégies d'une manière qui n'est ni linéaire, ni en escalier, ni forcément liée à un âge précis, tel que le suggérait Piaget (1929, 1966). Il pourrait ainsi y avoir un lien entre cette idée de chevauchement des intuitions et des stratégies et le concept de contrôle inhibiteur.

Un modèle pertinent pour mettre en évidence le rôle du contrôle inhibiteur dans l'apprentissage est le modèle des trois systèmes cognitifs (Houdé et Borst, 2015). Houdé et Borst mentionnent que leur modèle tire ses origines des travaux de Kahneman, Slovic et Tversky (1982) sur la pensée intuitive. Pour ces auteurs, les pensées intuitives se produisent naturellement, sans effort, automatiquement, rapidement (Kahneman, 2011; Kahneman *et al.*, 1982). Bien que la pensée intuitive puisse être efficace et fiable dans certains contextes, elle peut aussi mener les individus à commettre des erreurs. À l'instar de leurs prédécesseurs qui utilisaient un modèle à deux systèmes, Houdé et Borst (2015) désignent ces pensées intuitives au sein de leur modèle par l'appellation *Système 1* ou *Système heuristique* (Evans, 2011; Evans et Stanovich, 2013; Kahneman, 2011; Kahneman *et al.*, 1982; Stanovich et West, 2000). Dans ce modèle, une heuristique est

une règle intuitive, rapide, peu coûteuse, qui fonctionne souvent, mais peut mener à des erreurs systématiques dans certains cas (Borst, 2016; Houdé et Borst, 2015). D'ailleurs, certaines heuristiques sont documentées puisqu'elles sont sources d'erreurs fréquentes chez les élèves, comme « longueur-égale-nombre » (Houdé *et al.*, 2011; Houdé et Guichart, 2001) et « plus de A-plus de B » (Stavy *et al.*, 2002).

Houdé et Borst (2015) s'appuient également sur les travaux de Piaget portant sur le développement de l'enfant. C'est à la lumière du cadre théorique piagétien qu'ils identifient la pensée réfléchie et logicomathématique comme deuxième système de pensée, auquel ils réfèrent dans leur modèle par l'appellation *Système 2* ou *Système algorithmique*. Faire appel à ce système de pensée est souvent plus long et plus exigeant d'un point de vue cognitif, mais mène généralement à produire un raisonnement ou une réponse plus réfléchie, contrôlée et davantage adaptée au contexte. Il importe de préciser que certains auteurs émettent des réserves quant au choix des termes « qualitatifs » employés pour décrire et distinguer ces deux systèmes de pensées, soutenant que ceux-ci ne devraient pas être présentés comme étant dichotomiques (pour une revue, voir De Neys, 2021). Évidemment, cela ne met pas en doute la pertinence de s'intéresser à ces deux systèmes de pensée qui sont sous-tendus par des raisonnements différents (De Neys, 2021; Evans, 2018; Pennycook, 2018). En outre, Houdé et Borst (2015) soutiennent qu'accéder au système algorithmique est possible seulement si un mécanisme important entre en jeu : le contrôle inhibiteur. C'est ce *Système 3*, déployé via le cortex préfrontal du cerveau, qui permet de résister à la pensée heuristique pour mobiliser la pensée algorithmique lorsque la situation l'exige. Le *Système 3*, celui du *contrôle inhibiteur*, joue donc en quelque sorte un rôle d'arbitre entre le système heuristique et le système algorithmique (Houdé et Borst, 2018).

Bien que Houdé n'y fasse pas directement référence lorsqu'il présente son modèle des trois systèmes cognitifs (aussi appelée *théorie de l'inhibition cognitive*), l'idée selon laquelle deux systèmes de pensée différents coexistent dans le cerveau humain était déjà présente dans les théories cognitivistes du traitement de l'information chez l'homme et est connue sous le nom de *théorie algorithmico-heuristique*. Les fondements de cette théorie sont souvent associés aux travaux, initialement publiés en russe, du psychologue Landa (Landa, 1955, 1976) dans une perspective de « décomposer les processus cognitifs complexes et inobservables en opérations cognitives élémentaires, également inobservables, mais pouvant être exécutées sans ambiguïté par les apprenants et provoquées sans difficulté par les maîtres au cours de leur enseignement » (Raynal et Reunier, 2014, p. 57). Cette théorie a également été reprise par plusieurs théoriciens, dont Bloom (1956) et Gagné (1968) qui ont tous tenté de décomposer les activités

complexes et inobservables, comme la compréhension ou l'analyse, en activités élémentaires et observables. Il importe aussi de mentionner qu'en psychologie cognitive, le terme heuristique est fréquemment rattaché aux travaux de Newell et Simon (1972), qui ont documenté les heuristiques dans le contexte de la résolution de problèmes.

L'apport supplémentaire du modèle des trois systèmes cognitifs d'Houdé et Borst (2015) est de mettre en évidence le rôle central du contrôle inhibiteur dans le raisonnement et les apprentissages au regard de la pensée intuitive (heuristique) et de la pensée analytique (algorithmique). Ce modèle sera retenu dans le contexte de la présente recherche puisqu'il est possible d'associer le système heuristique aux conceptions intuitives en sciences, ainsi que le système algorithmique aux concepts scientifiques à apprendre. En fait, ce modèle est assez général pour être utilisé au regard de différents apprentissages scolaires qui sont contre-intuitifs et qui nécessitent de mobiliser le contrôle inhibiteur, ce qui est le cas de plusieurs apprentissages scientifiques. De plus, ce modèle est en convergence avec la théorie cognitive de Siegler (1996) suggérant que l'enfant peut adhérer à une multitude de conceptions et être capable de mobiliser une variété de stratégies. En somme, le modèle des fonctions exécutives de Diamond (2013) sera retenu pour situer le contrôle inhibiteur au sein des autres fonctions exécutives qui paraissent fondamentales dans la réussite. Le modèle des trois systèmes cognitifs de Houdé et Borst (2015) sera retenu pour mettre en évidence le rôle du contrôle inhibiteur comme mécanisme qui permet de résister aux intuitions dans le but de mobiliser une pensée qui est le produit d'un raisonnement analytique. Il existe différentes méthodes pour mesurer et étudier le contrôle inhibiteur. Celles-ci seront discutées dans la section qui suit.

2.1.2 Différentes mesures du contrôle inhibiteur

Pour inférer le recours du contrôle inhibiteur, deux principaux types de mesures sont souvent utilisés dans les recherches en psychologie cognitive, en neurosciences et en neuroéducation : les mesures de l'activité cérébrale (par ex. imagerie cérébrale, électroencéphalographie) et les mesures comportementales (par ex. : temps de réponse et performance) (Mason et Zaccoletti, 2021). Au niveau cérébral, la mobilisation du contrôle inhibiteur se traduit par l'activation de certaines zones spécifiques du lobe frontal du cerveau (Fuster, 2015). Plus précisément, la première région qui s'active habituellement est le cortex cingulaire antérieur (CCA) qui est responsable de détecter un conflit (Botvinick, 2007; Bush *et al.*, 2000). Ce mécanisme aurait pour effet d'envoyer un signal d'alarme (van Veen et Carter, 2002) visant à orienter la prise de décision comportementale vers des tâches et des stratégies cognitivement efficaces (Botvinick, 2007). Une fois le conflit détecté, les zones qui peuvent s'activer sont le cortex préfrontal ventrolatéral

(CPVL) (Aron *et al.*, 2004) et le cortex préfrontal dorsolatéral (CPDL) (Buchsbaum *et al.*, 2005). Il importe de mentionner qu'en fonction de la tâche proposée par les chercheurs, il se peut que d'autres zones cérébrales soient sollicitées, comme le gyrus angulaire (Masson *et al.*, 2014) ou le cortex prémoteur (Brault Foisy *et al.*, 2015). Malgré ces distinctions mineures d'une étude à l'autre, l'activation du cortex préfrontal est le plus souvent associée à l'activation des fonctions exécutives, dont le contrôle inhibiteur (pour une revue, voir Mason et Zaccoletti, 2021).

De plus, des mesures comportementales sont pratiquement toujours collectées dans les études où l'on vise à inférer la mobilisation du contrôle inhibiteur, soit en compléments aux mesures cérébrales, soit pour servir de mesure de base (Mason et Zaccoletti, 2021). Généralement, le contrôle inhibiteur se reflète par une performance un peu moins grande et des temps de réponse légèrement plus longs (Kelemen *et al.*, 2013; Kelemen et Rosset, 2009) et cela a été observé dans plusieurs études (par ex. Allaire-Duquette *et al.*, 2019; Potvin et Cyr, 2017). En fait, le temps de réponse peut être un indicateur de la complexité du raisonnement qu'une personne effectue (Denes et Pizzamiglio, 1999; Kandel *et al.*, 2000). Un élève qui doit inhiber pour répondre correctement effectue une étape de plus lorsqu'il réfléchit, ce qui lui prend un peu plus de temps que s'il ne devait pas faire cette étape supplémentaire. C'est ce qui explique possiblement pourquoi, sous la contrainte du temps, même les experts ont davantage tendance à faire des erreurs : ils n'ont pas le temps nécessaire pour inhiber leurs conceptions intuitives (Kelemen *et al.*, 2013; Kelemen et Rosset, 2009). Certains chercheurs soulignent toutefois qu'il peut être difficile de dissocier et de mesurer exclusivement une seule fonction exécutive lors d'une tâche cognitive, notamment en raison de « l'impureté » des tâches (Nigg, 2000). Par contre, Friedman et Miyake (2004) ont montré à l'aide d'une analyse à variable latente qu'il était possible de distinguer le contrôle inhibiteur, ainsi que ses différentes composantes, lors d'une tâche cognitive. Ces résultats mettent en lumière l'importance pour les chercheurs de savoir précisément quelle composante du contrôle inhibiteur ils souhaitent mesurer afin de choisir une tâche cognitive qui soit adaptée aux objectifs de recherche.

Plusieurs tâches cognitives nécessitent que les participants mobilisent leur contrôle inhibiteur. Plus spécifiquement, elles sont conçues de manière à ce que les participants doivent inhiber à certains moments précis. Utilisées en laboratoire, ou même en salle de classe, elles se sont révélées efficaces pour mieux comprendre ce qui caractérise la mobilisation du contrôle inhibiteur. Une tâche classique est la tâche de Stroop (1935) qui avait déjà été utilisée dans plus de 400 études au début des années quatre-vingt-dix (MacLeod, 1991). Dans cette tâche, les items sont des noms de couleurs écrits avec des encres

de différentes couleurs. Les participants doivent nommer successivement le nom des couleurs (encres) qu'ils aperçoivent (par ex. rouge, bleu, vert). Parfois, les noms et les encres sont présentés de manière à ce que les deux éléments concordent (par ex. rouge écrit en rouge). Ce type d'item est dit *congruent*; le participant peut répondre rapidement, intuitivement. D'autres fois, il arrive que la couleur de l'encre diffère du nom de la couleur qui est écrite (par ex. rouge). Lorsque le mot écrit est différent de la couleur de l'encre, l'individu doit inhiber, c'est-à-dire résister à la tentation de lire le mot qui interfère avec la couleur de l'encre. En laboratoire, ceci s'appelle un item *incongruent* et les chercheurs enregistrent de manière assez systématique un léger délai dans les temps de réponse à tous les items incongruents, qu'ils attribuent à ce besoin de mobiliser le contrôle inhibiteur. Il est intéressant de mentionner que la tâche de Stroop a été adaptée aux enfants qui ne sont pas encore des lecteurs. Ainsi, il existe une tâche « Stroop animal » (Wright *et al.*, 2003) dans laquelle l'enfant doit identifier un animal en se basant sur la tête de l'animal, mais dans laquelle le corps interfère parfois (voir par ex. Mason *et al.*, 2019). Dans les recherches en éducation, la tâche de Stroop est parfois utilisée pour effectuer des corrélations entre la capacité à inhiber d'un élève et sa performance dans des tâches scolaires qui impliquent d'inhiber une conception intuitive (Vosniadou *et al.*, 2018a).

Un autre type de tâche qui permet de révéler le recours au contrôle inhibiteur est la tâche Go-NoGo (Gordon et Caramazza, 1982; Ratcliff, 1978). Dans cette tâche, le participant doit appuyer sur un bouton chaque fois qu'il voit une lettre apparaître à l'écran. Le participant développe donc le réflexe d'appuyer régulièrement sur un bouton. Le chercheur pose toutefois une exception : le plus souvent, il est demandé au participant de ne pas appuyer sur le bouton quand la lettre X apparaît. Ainsi, le participant doit inhiber un geste devenu automatique et ceci se traduit, comme dans la tâche de Stroop, par un léger délai dans les temps de réponse à tous les items incongruents, ce qui suggère une implication du contrôle inhibiteur.

La logique sous-jacente à ces tâches cognitives dans lesquelles des items congruents et incongruents se succèdent dans le but mesurer les différences dans les temps de réponse a été utilisée pour concevoir des tâches visant à révéler la mobilisation du contrôle inhibiteur pour différents apprentissages scolaires. Par exemple, en sciences, plusieurs conceptions intuitives peuvent interférer avec les concepts scientifiques que les élèves doivent apprendre. Ainsi, Potvin et ses collègues (2015a) ont utilisé une tâche cognitive appelée « Flotte Coule » afin de vérifier si les élèves du secondaire (n = 128) de 14 et 15 ans devaient toujours inhiber la conception intuitive suggérant que « les objets lourds coulent davantage ». Dans cette tâche, les élèves voyaient deux balles sur un écran et devaient dire, parmi les deux balles, laquelle coulerait

davantage dans l'eau. Les résultats montrent un léger délai dans les réponses pour les items incongruents, c'est-à-dire lorsque la balle la plus lourde n'est pas celle qui coule davantage. Des tâches cognitives semblables existent également pour vérifier si le contrôle inhibiteur est nécessaire pour résister à d'autres conceptions intuitives en sciences, notamment la conception suggérant que « ce qui est mobile est nécessairement vivant » (Brault Foisy *et al.*, en révision; Skelling-Desmeules *et al.*, 2021). Ainsi, un ensemble de tâches cognitives, qui se sont avérées efficaces à plusieurs reprises, permet de révéler la mobilisation du contrôle inhibiteur dans une variété de contextes, notamment dans le contexte d'apprentissages scientifiques.

2.1.3 Contrôle inhibiteur et apprentissages scientifiques

Les fonctions exécutives, dont le contrôle inhibiteur, s'avèrent fondamentales pour réaliser différents apprentissages conceptuels en sciences, notamment en ce qui concerne la compréhension et l'application des connaissances (Rhodes *et al.*, 2014). Une des premières études qui a établi le lien entre les conceptions intuitives et la mobilisation du contrôle inhibiteur est celle de Kwon et Lawson (2000). Dans leur étude, 210 élèves de 13 à 16 ans provenant de quatre écoles secondaires différentes ont réalisé une série de tâches cognitives : quatre tâches portant sur l'activité du lobe préfrontal (incluant l'habileté à inhiber), un test de raisonnement scientifique et un test portant sur des concepts liés à la pression atmosphérique. À la suite de cette batterie de tests, tous les élèves ont bénéficié d'une intervention de 14 semaines visant à acquérir les concepts scientifiques liés à la pression atmosphérique. Ils ont ensuite fait à nouveau le test portant sur ces concepts. Les résultats montrent que les habiletés de contrôle inhibiteur mesurées au départ représentaient le meilleur prédicteur de la réussite au test effectué à la suite de l'intervention et expliquaient 28,1 % de la variance. Ces résultats ont mené Kwon et Lawson (2000) à identifier deux processus simultanés permettant l'acquisition de concepts scientifiques : 1- le contrôle inhibiteur qui permet de rejeter des informations intuitives ou non pertinentes pour la tâche et 2- la capacité de mobiliser des informations pertinentes pour la tâche, notamment des arguments hypothético-déductifs complexes et des concepts scientifiques contre-intuitifs.

Plusieurs études subséquentes ont également tenté de vérifier s'il était possible d'établir un lien entre la capacité à inhiber et le raisonnement scientifique. Ayant pour objectif d'étudier les régions cérébrales mobilisées par des adultes qui complètent une tâche en physique, Dunbar, Fugelsang et Stein (2007) ont mené une étude pilote portant sur une conception intuitive répandue en physique mécanique, soit « les objets lourds tombent plus vite » en utilisant un appareil d'imagerie cérébrale fonctionnelle (IRMf). Bien

que préliminaires, leurs résultats montrent des différences au niveau de l'activité cérébrale entre des experts et des novices. Lorsqu'ils devaient évaluer la véracité de films dans lesquels des balles tombaient à des vitesses différentes, les experts activaient davantage les zones préfrontales de leur cerveau. Dunbar et ses collègues (2007) suggèrent que l'activation des zones préfrontales chez les experts met en évidence que ceux-ci détiennent toujours de fausses conceptions qu'ils doivent inhiber. Les résultats de cette étude n'ont pas été publiés dans une revue scientifique, mais ont néanmoins suscité l'intérêt d'autres chercheurs qui ont tenté de mieux comprendre l'implication du contrôle inhibiteur en comparant des novices et des experts, et ce, pour l'ensemble des disciplines scientifiques.

S'inspirant de la méthodologie de cette étude, Masson et ses collaborateurs (2014) ont voulu vérifier si les experts détenaient toujours de fausses conceptions en électricité. Effectivement, une conception répandue suggère qu'il faille « un seul fil pour allumer une ampoule ». Masson et ses collègues (2014) ont recruté de jeunes adultes ($M_{\text{âge}} = 22$ ans), soit des étudiants universitaires de 1^{er} cycle, et les ont regroupés en fonction de leur expertise en science. Le groupe des « novices » était composé d'étudiants universitaires inscrits dans des programmes en sciences humaines, tandis que le groupe des « experts » était composé d'étudiants inscrits dans un programme en physique. Les chercheurs ont comparé ces deux groupes de participants lorsqu'ils effectuaient une tâche cognitive durant laquelle les participants devaient évaluer la véracité de circuits électriques pendant qu'un appareil IRMf captait des images de leur cerveau. Il en ressort que les experts activaient davantage leur cortex préfrontal que les novices. Les auteurs de cette étude suggèrent que ceux-ci devaient activer cette région pour inhiber la conception intuitive suggérant qu'il faille un seul fil pour allumer une ampoule. En inhibant cette conception intuitive erronée, ils parvenaient à sélectionner le concept scientifiquement valide selon lequel il faut deux fils pour qu'une ampoule s'allume dans un circuit électrique.

En utilisant une méthodologie similaire à celle de Masson et ses collègues (2014) et en s'inspirant de l'étude pilote de Dunbar et ses collaborateurs (2007), Brault Foisy et ses collaborateurs (2015) ont également voulu vérifier si les « experts » en physique détiennent toujours de fausses conceptions qu'ils doivent inhiber. Ils se sont intéressés à la conception intuitive répandue en physique mécanique suggérant que « ce qui est lourd tombe plus vite ». Ils ont comparé un groupe de novices et un groupe d'experts qui devaient visionner de courts films présentant différents stimuli, chacun composé de deux balles qui tombent. Ensuite, ils devaient identifier si la chute des balles respectait les lois de Newton. En convergence avec les résultats de Masson et al. (2014), les résultats de Brault Foisy et al. (2015) indiquent que les

experts activaient davantage leur cortex préfrontal que les novices, ce qui suggère qu'ils devaient inhiber la conception intuitive répandue « les objets lourds tombent plus vite que les objets légers » afin de répondre correctement. Les résultats de ces deux recherches montrent que les participants qui répondaient correctement aux stimuli incongruents sont ceux qui parvenaient à résister à leurs conceptions intuitives afin de mobiliser une explication scientifique. Les résultats de Masson et al. (2014) et de Brault Foisy et al. (2015) soutiennent ainsi l'hypothèse que l'expertise en sciences serait liée à la capacité à inhiber ses conceptions intuitives.

Pour faire suite à ces études qui comparaient des adultes ayant des niveaux d'expertise différents, Allaire-Duquette et ses collègues (2019) se sont intéressés aux différences individuelles au sein d'un bassin d'élèves de 5^e secondaire qui suivent le même cursus scolaire. Plus précisément, ils ont ciblé des élèves avec de bonnes habiletés en lecture, mais dont les habiletés en sciences diffèrent, et les ont séparés en deux groupes en fonction de leur niveau de compétence en sciences. Dans un appareil IRMf, les participants devaient valider la véracité de 128 énoncés scientifiques (énoncés de type vrai ou faux). Les résultats indiquent un effet d'interaction entre le niveau de compétence en sciences et l'activité cérébrale des élèves lorsqu'ils devaient évaluer les énoncés incongruents (i.e. lorsque la conception intuitive ne mène pas à la bonne réponse et qu'il faut y résister). Plus précisément, les élèves ayant un niveau de compétence plus élevé répondaient significativement mieux que les élèves ayant un niveau de compétence moins élevé. De plus, ils activaient davantage leur cortex préfrontal ventrolatéral gauche et leur cortex préfrontal dorsolatéral. Les auteurs de cette étude associent ces activations à la mobilisation du contrôle inhibiteur, ce qui suggère que les élèves du secondaire présentant un niveau de compétence plus élevé sont ceux qui activent davantage ces régions. Ceux-ci parviennent possiblement mieux à mobiliser leur contrôle inhibiteur pour résister à des conceptions intuitives. L'étude d'Allaire-Duquette et ses collaborateurs (2019) semble être la seule étude à avoir utilisé l'imagerie cérébrale et les temps de réponse auprès d'élèves du secondaire.

À la suite de ces recherches qui suggèrent que l'expertise en sciences puisse être liée à la mobilisation du contrôle inhibiteur chez les adolescents et les jeunes adultes, notamment lors de tâches contre-intuitives qui impliquent de résister à des conceptions intuitives, d'autres chercheurs ont voulu vérifier si, dans le cas de certaines conceptions intuitives, il est nécessaire pour les adultes d'inhiber durant toute leur vie, et non seulement au moment d'acquiescer le concept scientifique. En ce sens, Shutlman et Harrington (2015) ont comparé deux groupes d'adultes d'âge différents ($M_{\text{âge}} = 19,6$ ans vs $M_{\text{âge}} = 65,1$ ans) et de professions

différentes (scientifiques vs non-scientifiques) dans le but de vérifier l'effet de l'âge et de l'expertise sur la mobilisation du contrôle inhibiteur. Ils se sont intéressés à des conceptions intuitives relatives à dix domaines scientifiques, incluant notamment l'astronomie, la matière et la mécanique. Les participants devaient évaluer la validité de 200 énoncés scientifiques, pour lesquels la conception intuitive pouvait parfois mener à une erreur, mais également à une bonne réponse dans certains cas. Leurs résultats indiquent que les adultes plus jeunes répondaient plus rapidement que les adultes plus âgés, tant pour les items congruents que pour les items incongruents. Par ailleurs, indépendamment de l'âge, les participants répondaient plus lentement et performaient moins bien aux items incongruents, c'est-à-dire aux items pour lesquels l'énoncé à valider n'est pas compatible avec la conception intuitive qui lui est associée. Également, l'écart dans les temps de réponse pour les items incongruents était plus prononcé chez les adultes plus âgés, incluant les adultes pratiquant une profession scientifique. En ce qui a trait à l'expertise, les adultes de professions scientifiques répondaient plus rapidement et performaient mieux que les autres adultes. Par ailleurs, des différences significatives étaient tout de même observées pour les items incongruents : les scientifiques répondaient plus lentement et commettaient davantage d'erreurs pour ces items que pour les items congruents. À la lumière de leurs résultats, Sthulman et Harrington (2015) concluent que ni l'âge ni la pratique prolongée d'une profession scientifique ne semble parvenir à éradiquer la présence de conceptions intuitives : celles-ci continuent à persister, et ce, pour toutes les disciplines scientifiques. Ainsi, même dans le cas de concepts relativement simples appris à l'école primaire, les scientifiques professionnels doivent encore inhiber au terme de leur carrière.

Dans un même ordre d'idées, Allaire-Duquette et ses collaborateurs (2021) se sont intéressés à savoir si les conceptions intuitives persistaient même chez les scientifiques de très haut niveau, c'est-à-dire les titulaires d'un doctorat en physique (n = 25). Dans cette étude impliquant l'imagerie cérébrale, les participants devaient également évaluer la validité d'énoncés scientifiques relatifs à la physique et à la biologie. En convergence avec les résultats de Shtulman et Harrington (2015), les résultats comportementaux d'Allaire-Duquette et al. (2021) indiquent que pour les énoncés incongruents, les participants étaient significativement plus lents et moins précis que pour les énoncés congruents. Quant aux résultats cérébraux, ils indiquent que les participants activaient davantage les zones frontales de leur cerveau lorsqu'ils devaient évaluer les énoncés incongruents. Allaire-Duquette et ses collègues (2021) soulignent que les conceptions intuitives semblent profondément ancrées dans la cognition humaine, en plus d'être renforcées sur une base quotidienne. En somme, les résultats de Shutlman et Harrington (2015) et d'Allaire-Duquette et ses collaborateurs (2021) arrivent à la même conclusion : il semble que la

mobilisation du contrôle inhibiteur puisse demeurer nécessaire même chez les adultes, incluant des scientifiques de haut niveau, pour résister à des conceptions intuitives qui semblent demeurer encodées dans les réseaux neuronaux des individus.

Par ailleurs, peu d'études semblent s'être intéressées au rôle du contrôle inhibiteur dans l'apprentissage de concepts scientifiques chez les enfants d'âge préscolaire ou primaire, possiblement parce que le cortex préfrontal et le mécanisme de contrôle inhibiteur se développent jusqu'au début de l'âge adulte (Gogtay *et al.*, 2004; Huttenlocher et Dabholkar, 1997) ou peut-être parce qu'il est plus surprenant que les adultes et les experts doivent encore inhiber leurs conceptions intuitives dans plusieurs contextes. D'ailleurs, dans leur recension des écrits portant sur le contrôle inhibiteur et les apprentissages scientifiques, Mason et Zaccoletti (2021) ont recensé seulement trois articles scientifiques portant spécifiquement et exclusivement sur les élèves du primaire, soit celui de St Clair-Thompson et Gathercole (2006), celui de Vosniadou et ses collègues (2018a) et celui de Mason et ses collègues (2019). Il importe de mentionner que les auteurs de ces trois articles observent tous une relation entre le contrôle inhibiteur et l'apprentissage des sciences au primaire (Mason *et al.*, 2019; St Clair-Thompson et Gathercole, 2006; Vosniadou *et al.*, 2018). En fait, l'analyse de Mason et Zaccoletti (2021) souligne qu'après avoir contrôlé les variables potentiellement interférentes, le contrôle inhibiteur est associé à une meilleure expertise en sciences, telle que mesurée par la réussite dans des tests standardisés (St Clair-Thompson et Gathercole, 2006), dans des tâches informatisées exigeant la catégorisation et la recatégorisation de concepts (Vosniadou *et al.*, 2018a) et dans les progrès dans les apprentissages scientifiques après la lecture d'un texte de réfutation (Mason *et al.*, 2019).

Seulement deux autres recherches ne semblent pas faire partie de la revue de Mason et Zaccoletti (2021), soit celle de Wilkinson et ses collègues (2019) et celle de Ronfard et ses collègues (2021). Ayant pour objectif de vérifier si les élèves du primaire devaient aussi inhiber leurs conceptions intuitives, Wilkinson et ses collègues (2019) se sont intéressés aux élèves de 3^e année ($n = 373$) et de 5^e année ($n = 264$) et à plusieurs conceptions intuitives relatives aux sciences et aux mathématiques. Leurs résultats montrent, avec des tailles d'effet importantes ($d = 0,69$), que dès la 3^e année, la majorité des erreurs commises par les élèves lors de tâches contre-intuitives sont associées à des conceptions intuitives qui n'ont pas été inhibées. Ce constat s'applique également aux élèves de 5^e année ($d = 0,71$). Cette étude confirme ainsi que les enfants entretiennent des conceptions erronées en lien avec des concepts scientifiques faisant partie des contenus à apprendre au primaire. Les résultats montrent également que dans le cas des

questions à choix multiples, les enfants qui se trompent sont plus susceptibles de répondre par une conception intuitive que par une réponse incorrecte plus générale. Enfin, leurs résultats montrent une corrélation entre la réussite à une tâche de Stroop Animal, la réussite dans une tâche contre-intuitive en sciences et la réussite scolaire au primaire.

Dans un même ordre d'idées, une étude menée auprès des élèves de 2^e et 3^e année a montré que les enfants sont capables d'apprendre les fondements de la théorie de l'évolution, pourtant reconnue comme étant contre-intuitive au regard de nombreuses croyances entretenues par les jeunes enfants, notamment les croyances téléologiques (Ronfard *et al.*, 2021). Leurs résultats soulignent aussi qu'une fois le concept scientifique appris, les fonctions exécutives jouent un rôle continu dans le raisonnement en inhibant les explications intuitives concurrentes qui continuent à coexister chez les enfants. Les résultats de Ronfard et ses collègues (2021) ainsi que ceux de Wilkinson et ses collègues (2019) sont cohérents avec des études développementales qui suggèrent que l'efficacité du mécanisme de contrôle inhibiteur peut se traduire par une amélioration des performances dans une tâche à partir de l'âge de 7 ans (Dowsett et Livesey, 2000). Même si peu de recherches s'intéressent spécifiquement aux élèves du primaire, le lien entre la capacité à inhiber et la réussite en sciences à ce niveau scolaire semble assez probable. En effet, plus les capacités de contrôle inhibiteur des enfants sont élevées, plus leur performance dans les domaines scientifiques l'est aussi (Mason et Zaccoletti, 2021).

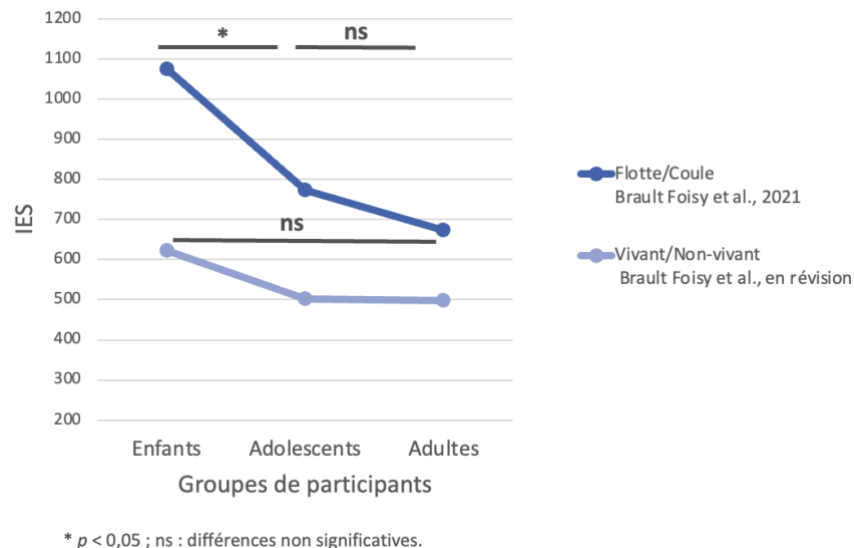
Il apparaît par ailleurs que certaines conceptions intuitives pourraient être plus robustes que d'autres (Chi, 2005) et nécessiter une mobilisation du contrôle inhibiteur plus importante. En ce sens, il est pertinent de s'intéresser aux études qui ont porté sur plusieurs conceptions afin de voir si la mobilisation du contrôle inhibiteur s'observe de manière semblable pour toutes les conceptions intuitives auxquelles il faut résister. Il est important de souligner que peu d'études se sont intéressées à plusieurs conceptions au sein d'une même recherche. Lorsque cela est le cas, les énoncés des tâches ne sont pas toujours équivalents. Ceci a pour effet de rendre très difficile la comparaison du niveau de contrôle inhibiteur requis puisque, si les tâches ne sont pas équivalentes, il n'est pas possible de comparer les écarts entre les temps de réponse. Une étude importante qui tient compte de plusieurs conceptions est celle de Shtulman et Valcarcel (2012). Dans cette étude, des étudiants universitaires (n = 150) ont réalisé une tâche de raisonnement rapide de type vrai/faux qui touchait 10 domaines scientifiques et mobilisait 200 énoncés relatifs à plusieurs conceptions intuitives fréquentes et documentées. Les énoncés étaient formulés de manière assez équivalente en termes de complexité et en termes de nombre de mots. Ce qui ressort de cette étude est

que les participants performaient mieux pour les énoncés et les domaines pour lesquels l'apprentissage des concepts scientifiques se produit dans les 10 premières années de la vie de l'enfant (par ex. les fractions, les microbes et la physiologie) que pour ceux pour lesquels les apprentissages se réalisent plus tardivement (par ex. l'évolution et la mécanique). Shtulman et Valcarcel (2012) avancent également l'idée que les conceptions intuitives qui émergent et se construisent très tôt dans la vie de l'enfant sont possiblement plus profondément ancrées, ce qui pourrait avoir une incidence non seulement sur le raisonnement scientifique, mais aussi sur la manière dont les élèves encodent et organisent l'information relativement à un domaine scientifique précis. Par ailleurs, les résultats de cette étude s'attardent à des groupes de conceptions, liées à des disciplines scientifiques, plutôt qu'à des conceptions présentées de manière distincte.

Sachant que le recours au contrôle inhibiteur est souvent nécessaire, et ce, peu importe l'âge et la discipline scientifique, Brault Foisy et ses collaborateurs (2021, en révision) ont voulu étudier la mobilisation du contrôle inhibiteur dans une perspective développementale, c'est-à-dire en s'intéressant à l'évolution du besoin d'inhiber une même conception intuitive à différents âges. Pour ce faire, ils ont mené deux études en utilisant des méthodologies très similaires et impliquant les mêmes participants, ce qui rend la comparaison entre elles possible. La première étude (2021) s'intéresse à une conception intuitive fréquente en physique suggérant que « les gros objets coulent davantage », tandis que la deuxième étude (en révision) s'intéresse à une conception intuitive relative à la biologie qui suggère que « ce qui bouge est vivant ». Ce sont les mêmes participants qui ont pris part aux deux études, soit des élèves du primaire ($M_{\text{âge}} = 11$ ans), des élèves du secondaire ($M_{\text{âge}} = 17$ ans) et des étudiants universitaires ($M_{\text{âge}} = 24$ ans). Les deux études impliquaient des tâches cognitives conçues selon un paradigme d'amorçage négatif et peuvent être considérées comme étant équivalentes. L'amorçage négatif est un paradigme expérimental qui permet d'inférer la mobilisation du contrôle inhibiteur en mesurant les temps de réponse et le taux de réponses correctes. Dans les tâches en amorçage négatif, les items sont présentés selon deux conditions, test et contrôle, pour lesquelles seule l'amorce diffère. Dans la condition contrôle, un item *neutre*, pour lequel la conception intuitive n'entre pas en jeu, est présenté en amorce. Cet item neutre est suivi par un item *congruent* en cible. Dans la condition test, un item *incongruent* est présenté en amorce et est suivi, comme dans la condition contrôle, par un item *congruent* en cible. La logique derrière l'amorçage négatif est la suivante : lorsqu'un participant doit inhiber une conception intuitive pour répondre correctement à un item et que l'item, et que l'item suivant lui demande de réactiver cette même conception intuitive pour bien répondre, cela se traduit par un léger délai dans les temps de

réponse et par des taux de réponses correctes plus faibles. Dans les analyses, les chercheurs comparent les temps de réponse et les taux de réponses correctes obtenus en cible pour les deux conditions. Certains chercheurs calculent ensuite la performance globale des participants (« *inverse efficiency score* » [IES]; Bruyer et Brysbaert, 2011), un score qui combine les temps de réponse et le taux de réponses correctes en une seule variable. Ce score est obtenu en divisant le temps de réponse par le taux de réponses correctes. Un score élevé est considéré comme étant représentatif d'un effort cognitif plus important, associé à la mobilisation du contrôle inhibiteur. La Figure 2.1 ci-dessous compare l'IES en cible pour les trois groupes d'âge lors de la condition test (item incongruent, suivi d'un item congruent) au regard des deux conceptions intuitives étudiées.

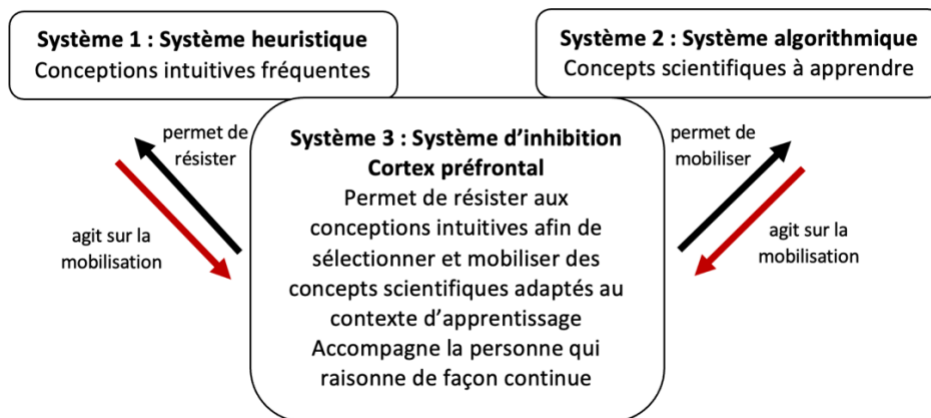
Figure 2.1 IES obtenu en cible pour la condition test pour chaque groupe d'âge lors de la complétion des deux tâches de Brault Foisy et ses collaborateurs (2021; en révision)



Dans l'étude portant sur le vivant (en **bleu pâle** sur la Figure 2.1), l'IES est constant pour les trois groupes d'âge. Pour les auteurs de l'étude, ce résultat signifie que le mécanisme du contrôle inhibiteur est suffisamment fonctionnel pour permettre aux élèves de 5^e année d'inhiber la conception intuitive suggérant que « ce qui est mobile est nécessairement vivant » et que ce besoin d'inhiber est assez constant à tous les âges. Par contre, dans l'étude portant sur la flottabilité (en **bleu foncé** sur la Figure 2.1), l'IES diminue significativement avec l'âge, ce qui suggère que l'effort cognitif déployé pour inhiber la conception en jeu est moins grand chez les adolescents et les adultes. Il est possible que l'exposition à l'éducation scientifique contribue à rendre la mobilisation du contrôle inhibiteur moins importante (Brault Foisy *et al.*, 2021). Considérant que ce sont les mêmes participants qui ont participé aux deux études, la

comparaison entre elles met en lumière que certaines caractéristiques liées au contenu d'apprentissage influencent la mobilisation du contrôle inhibiteur. Certaines conceptions intuitives sont possiblement plus robustes que d'autres, faisant en sorte qu'il peut être plus difficile d'y résister. Par contre, la flottabilité est un concept scientifique possiblement plus complexe que la distinction entre le vivant et le non-vivant. Pourtant, l'IES est de moins grande amplitude chez les adolescents et les adultes. Ces études sont en convergence avec celle de Ronfard et ses collègues (2021) : leurs résultats suggèrent que des caractéristiques intrinsèques au contenu scientifique lui-même, tant en ce qui a trait aux conceptions intuitives qu'aux concepts scientifiques associés, pourraient influencer la mobilisation du contrôle inhibiteur. Sachant que ces deux éléments ont un rôle à jouer dans l'apprentissage et la réussite en sciences et qu'ils sont arbitrés par le contrôle inhibiteur, nous proposons un modèle analogue à celui de Houdé et Borst (2015), contextualisé en didactique des sciences, tel que présenté à la Figure 2.2 ci-dessous. Potvin et Cyr (2017) mentionnent également que dans le contexte de l'apprentissage des sciences, plusieurs conceptions peuvent être sollicitées simultanément en fonction du contexte et qu'il n'y a pas toujours une compétition exclusive entre une seule heuristique et un seul algorithme. Notre modèle vise aussi à tenir compte de cela.

Figure 2.2 Modèle des trois systèmes cognitifs adapté à l'apprentissage des sciences



Ce modèle met en évidence que des variables didactiques, tant liées aux concepts à apprendre qu'aux conceptions auxquelles l'élève doit résister (se référer aux **flèches rouges** sur la Figure 2.2), peuvent influencer la mobilisation du contrôle inhibiteur, qui peut être plus ou moins importante, pour raisonner de manière contrôlée et adaptée au contexte. Le contrôle inhibiteur influence, pour sa part, ce qui s'active

et ne s'active pas (se référer aux **flèches noires** sur la Figure 2.2), en étant ancré dans la relation bidirectionnelle qui semble le caractériser.

En somme, le rôle du contrôle inhibiteur dans les apprentissages scientifiques est soutenu empiriquement par un important corpus de recherches (Allaire-Duquette *et al.*, 2019; Brault Foisy *et al.*, 2021; Brookman-Byrne *et al.*, 2018; Mareschal, 2016; Mason *et al.*, 2019; Masson *et al.*, 2014; Ronfard *et al.*, 2021; Shtulman et Harrington, 2015; Shtulman et Valcarcel, 2012; Vosniadou *et al.*, 2018a, 2018b). Il est aussi établi que les apprenants qui ont un contrôle inhibiteur plus efficace performant mieux dans des tâches contre-intuitives et dans des tâches de résolution de problèmes en mathématiques et en sciences (Brookman-Byrne *et al.*, 2018; Vosniadou *et al.*, 2018a; Zaitchik *et al.*, 2014). Par ailleurs, il ressort de ces différentes études que des variables liées aux conceptions intuitives persistantes ainsi qu'aux concepts scientifiques à apprendre pourraient agir sur le contrôle inhibiteur, faisant en sorte qu'une mobilisation plus ou moins importante soit nécessaire pour raisonner (Brault Foisy *et al.*, 2021; Kwon et Lawson, 2000; Ronfard *et al.*, 2021).

La prochaine section de ce cadre théorique décrit deux variables didactiques susceptibles d'influencer la mobilisation du contrôle inhibiteur dans le contexte de l'apprentissage des sciences. Il est à noter que les effets d'autres variables auraient pu être étudiés, notamment la variable *âge* (Potvin et Cyr, 2017) ou la variable *origine* des conceptions intuitives (Brookman-Byrne *et al.*, 2018). Néanmoins, par souci de cohérence avec le modèle théorique d'Houdé et Borst (2015), il a été choisi de cibler dans un premier temps deux variables qui sont chacune relative à un système de pensée.

2.2 Variables didactiques susceptibles d'influencer la mobilisation du contrôle inhibiteur

Cette deuxième partie du cadre théorique décrit deux variables didactiques qui semblent influencer la mobilisation du contrôle inhibiteur. Par ailleurs, puisqu'il semble assez clair que des caractéristiques liées aux conceptions intuitives (Système 1, heuristique) et des caractéristiques liées aux concepts scientifiques (Système 2, algorithmique) peuvent influencer le contrôle inhibiteur et le raisonnement scientifique, une variable liée à chacun des deux systèmes de pensée sera mise de l'avant. Plus précisément, la *familiarité* des conceptions intuitive et la *complexité* des concepts scientifiques semblent être, au regard des écrits qui seront présentés ci-après, deux variables didactiques susceptibles d'influencer la mobilisation du contrôle inhibiteur.

2.2.1 *Familiarité* des conceptions intuitives

Cette partie du cadre théorique présente la première variable didactique de cette étude, soit la *familiarité* des conceptions intuitives. Avant de pouvoir aborder directement la variable *familiarité*, il est nécessaire de définir ce que sont les conceptions intuitives. Leurs origines et leurs principales caractéristiques au regard des apprentissages scientifiques au primaire seront présentées. Par la suite, un bref survol de l'évolution du champ de recherche du changement conceptuel permettra de situer le contexte dans lequel s'inscrit la théorie de la coexistence des conceptions. Ensuite, la variable *familiarité* sera discutée au regard d'autres disciplines et contextes, puis sera définie plus opérationnellement à l'aide d'indicateurs relatifs à la quotidienneté, à la prévalence socioculturelle, à la familiarité sémantique, à l'intuitivité et à l'utilité perçue des conceptions intuitives en sciences.

2.2.1.1 Conceptions intuitives en sciences

L'existence et les origines des conceptions intuitives sont bien documentées par la recherche (Renouard et Mazabraud, 2018). En outre, au cours des trente dernières années, de nombreux chercheurs ont tenté de nommer et de décrire ces conceptions en leur attribuant différents qualificatifs, par exemple :

- Conceptions intuitives (Babai *et al.*, 2010)
- Conceptions initiales (Posner *et al.*, 1982)
- Conceptions naïves (Babai et Amsterdamer, 2008)
- Conceptions erronées (Toussaint, 2002)
- Conceptions primitives (diSessa, 1993)
- Conceptions fréquentes (Thouin, 1996)
- Conceptions alternatives (Planinic *et al.*, 2006)
- Préconceptions (Nussbaum et Novick, 1982)
- Conceptions d'élève (Giordan et de Vecchi, 1987)
- Règles intuitives (Stavy et Tirosh, 2000)

Il est intéressant de mentionner qu'en anglais, soit la langue de la majorité des écrits scientifiques, c'est le terme *misconception* qui semble le plus souvent utilisé par les chercheurs (Potvin, 2018). Ce terme a l'avantage d'être compris par les enseignants (Gomez-Zwiep, 2008). Toutefois, certains chercheurs évoquent sa connotation négative (Abimbola, 1988) pouvant affecter la confiance des apprenants (Stavy, 1991). Un élément intéressant à soulever est que les conceptions intuitives peuvent être utiles dans

certains contextes de la vie quotidienne (Potvin, 2013, 2018; Thouin, 2017), une réalité que le terme *misconception* n'évoque pas (Caravita et Halldén, 1994). Par ailleurs, le terme *misconception* se rapproche du terme *mistake* (erreur) et met l'accent sur le fait que quelque chose doit être corrigé (Potvin, 2013). Bien que différentes appellations soient utilisées d'une recherche à l'autre pour décrire les conceptions intuitives qu'entretiennent les élèves, elles réfèrent essentiellement à la même idée, c'est-à-dire qu' :

elles ne correspondent pas aux lois et théories de la science actuelle, mais expliquent néanmoins, de façon plus ou moins adéquate, certains aspects de l'univers matériel ou de l'univers vivant (...) [elles sont] souvent inspirées du sens commun (...) témoignent pourtant de modes de raisonnement organisés, qui présentent une certaine pertinence dans l'explication de plusieurs phénomènes naturels, ce qui explique d'ailleurs qu'elles persistent souvent jusqu'à l'âge adulte et qu'elles résistent à l'enseignement des sciences, tel qu'il est dispensé actuellement dans la plupart des écoles du monde (Thouin, 2017, p. 202).

Dans le contexte de ce mémoire, l'appellation « conception intuitive » sera privilégiée en convergence avec la tradition de recherche francophone et aussi pour mettre en évidence le lien entre ces conceptions et la pensée intuitive (Kahneman, 2011).

Comme évoqué dans la problématique et dans la section précédente du cadre théorique, les élèves du primaire entretiennent de nombreuses conceptions intuitives (Carey, 2000; Vosniadou, 1994). Ces conceptions peuvent être utiles dans certains contextes, mais sont incompatibles avec les connaissances scientifiques (diSessa, 2014). Certaines conceptions sont souvent partagées par plusieurs enfants; il est dans ce cas convenu de parler de conceptions intuitives *fréquentes* (Thouin, 2017). Thouin (2017) en répertorie d'ailleurs une centaine. Il importe également de souligner que les élèves de différentes cultures entretiennent souvent des conceptions intuitives similaires (Bahar et Polat, 2007). Malgré cela, il n'est pas exclu que certaines conceptions puissent être plus personnelles. Par ailleurs, elles touchent tous les domaines scientifiques (Shtulman et Valcarcel, 2012; Thouin, 2015, 2017). Chez les plus jeunes, il est assez commun qu'elles évoquent des explications de nature animiste (par ex. la Lune me suit, le vent entre chez moi) ou téléologique (par ex. j'ai un cœur pour pomper mon sang) (Thouin, 2017). Bien que leurs origines soient variées, elles sont souvent construites à travers les expériences personnelles des enfants et l'observation du monde qui les entoure. Par exemple, un enfant qui joue au soccer et qui frappe le ballon le verra toujours puisque le terrain est plat. Ceci pourtant entre en contradiction avec l'un des premiers apprentissages que les enfants réalisent à l'école, c'est-à-dire que la Terre est de forme sphéroïde (Allen, 2019). Pour Renouard et Mazabraud (2018), les interactions sociales de l'enfant contribuent aussi à faire

émerger certaines conceptions et à en renforcer d'autres. Les conceptions intuitives peuvent également être construites et/ou renforcées par l'école, les enseignants (Kellner *et al.*, 2011; Yoon et Kim, 2016), les manuels scolaires (King, 2010) et les médias (Tsai, 2001). Les élèves y adhèrent généralement parce qu'elles proposent des explications simples à des phénomènes récurrents, ou encore, simplement parce qu'ils n'ont aucune raison de les remettre en question. Leur caractère « robuste » est documenté depuis longtemps par de nombreux chercheurs (Chi, 2005; Solomon, 1983, 1987; Viennot, 1979).

Il semble que les conceptions intuitives soient également appelées à évoluer durant l'enfance, plus particulièrement chez les jeunes enfants. Dans une étude qualitative menée auprès d'enfants de 3 à 8 ans, Smolleck et Hershberger (2011) ont mis en évidence que plusieurs conceptions intuitives relatives à la matière, au magnétisme, à la densité et à l'air avaient tendance à évoluer, à se transformer et à se complexifier au fil des âges. Dans un même ordre d'idées, Potvin et Cyr (2017) ont comparé des groupes d'élèves du préscolaire, du primaire, du secondaire et des enseignants en sciences afin d'étudier à travers le temps l'évolution de trois conceptions (deux conceptions intuitives et un concept scientifique) concernant la flottabilité, soit « le volume détermine si un objet coule ou flotte », « la masse détermine si un objet coule ou flotte » et « la substance détermine si un objet coule ou flotte ». Les résultats de leur analyse de type *cluster* montrent que les enfants du préscolaire adhéraient davantage à la conception suggérant que le volume détermine si un objet coule ou flotte, tandis que les élèves du secondaire et les enseignants de sciences adhéraient davantage au concept scientifique, soit la substance détermine la flottabilité. Par ailleurs, leurs résultats mettent en lumière que les élèves du primaire (n = 557) étaient considérablement partagés entre les conceptions : 44 % adhéraient à la conception scientifique, 28 % à la conception intuitive suggérant que la masse détermine la flottabilité, 17 % à la conception suggérant que le volume détermine la flottabilité et 12 % à d'autres conceptions. Les conceptions semblent donc appelées à évoluer spécifiquement durant l'enfance, ce qui suggère que l'éducation et l'exposition aux concepts scientifiques peuvent jouer un rôle important durant cette période.

Cependant, il semble que les conceptions intuitives ne soient pas beaucoup prises en considération dans les pratiques pédagogiques des enseignants au primaire (Gomez-Swiep, 2008). Les données collectées lors d'entretiens individuels menés auprès de trente enseignants de 3^e, 4^e et 5^e année provenant de 12 écoles primaires situées dans des milieux variés montrent que la plupart des enseignants (57 %) savent assez bien ce qu'est une conception intuitive et attribuent les conceptions intuitives à des causes externes à l'élève (Gomez-Swiep, 2008). Par contre, 43 % des enseignants n'étaient pas capables de donner un exemple de

conception intuitive et seulement 10 % des enseignants interrogés ont fait des liens entre les conceptions intuitives et la cognition, la pensée ou les constructions mentales des élèves qui contribuent à leurs idées fausses. Cette étude est intéressante; d'une part, elle donne le portrait d'enseignants du primaire qui ne sont pas des spécialistes disciplinaires, mais qui enseignent tout de même les sciences. D'autre part, elle met en évidence que si les conceptions intuitives et la place importante qu'elles occupent dans le raisonnement scientifique sont connues des chercheurs, il semble que ce ne soit pas le cas en ce qui concerne les enseignants du primaire.

Comme l'existence des conceptions intuitives est documentée depuis longtemps, plusieurs chercheurs ont tenté non seulement de les recenser et de les caractériser, mais aussi de savoir ce qu'il advenait des conceptions intuitives après que les apprenants aient été exposés aux concepts scientifiques. L'ensemble de leurs travaux a donné naissance au champ de recherche du changement conceptuel (diSessa, 2014). Les recherches de ce champ ont longtemps suggéré que les conceptions intuitives des élèves n'étaient plus accessibles à la suite d'un changement conceptuel; il a d'abord été proposé qu'elles soient abandonnées (Villani, 1992), remplacées (Posner *et al.*, 1982), restructurées (Nersessian, 1989), réorganisées (Jensen et Finley, 1995) ou transformées (Ohlsson, 2009) (pour une revue, voir diSessa, 2014; Vosniadou, 2008). Plusieurs de ces chercheurs ont également proposé des modèles permettant de décrire et de prédire le changement conceptuel. Le premier modèle, qui semble avoir été le plus influent selon l'analyse de Potvin et ses collègues (2020), est celui de Posner, Strike, Hweson et Gertzog (1982). Ce modèle prend assise sur certains concepts développés par Piaget et Kuhn, notamment l'assimilation et l'accommodation. Ainsi, dans ce modèle, ainsi que dans les modèles de Naussbaum et Novick (1982), de Giordan et de Vecchi (1987) et de Vosniadou (1994), les conceptions intuitives disparaîtraient à la suite d'un changement conceptuel, c'est-à-dire qu'elles ne seraient plus disponibles. D'autres modèles, notamment celui de Carey (1985), celui de diSessa (1993) et celui de Stavy et Tirosh (2000) suggèrent plutôt que les conceptions intuitives ne disparaîtraient pas complètement. Ainsi, celles-ci pourraient évoluer, se restructurer (Carey, 1985), se réorganiser (diSessa, 1993) ou encore être surmontées (Stavy et Tirosh, 2000).

Plus récemment, la majorité des recherches appuient la théorie de la coexistence, suggérant que les conceptions intuitives continuent à exister aux côtés des concepts scientifiques appris, et ce, pour tous les individus (Dawson, 2014; Vaughn *et al.*, 2020; Vosniadou, 2020). Ainsi, les conceptions intuitives demeureraient encodées dans les connexions neuronales et ne disparaîtraient pas à la suite d'un

changement conceptuel. Un autre argument appuyant la théorie de la coexistence est que des études ont été menées auprès d'individus atteints de la maladie d'Alzheimer, une maladie qui a pour conséquence de diminuer l'efficacité des fonctions exécutives, dont celle du contrôle inhibiteur (Lombrozo *et al.*, 2007; Zaitchik et Solomon, 2008). Lorsqu'ils étaient questionnés sur des concepts scientifiques, les participants répondaient davantage par des explications animistes ou téléologiques, comme le font habituellement les jeunes enfants chez qui les fonctions exécutives ne sont pas pleinement efficaces. Ainsi, lorsque le contrôle inhibiteur est moins efficace et ne parvient pas à inhiber les conceptions intuitives des participants malades, ceux-ci répondent de manière intuitive plutôt qu'analytique (Lombrozo *et al.*, 2007; Zaitchik et Solomon, 2008). Ces études appuient donc la théorie de la coexistence puisqu'elles suggèrent elles aussi que les conceptions intuitives continuent à coexister aux côtés des concepts scientifiques, et ce, chez une même personne.

L'un des modèles s'inscrivant dans cette perspective de coexistence est le modèle de prévalence du changement conceptuel de Potvin (2013). Un élément intéressant de ce modèle que propose Potvin (2013) est que les conceptions intuitives revêtent un caractère familier pour les individus. Comme elles sont utilisées dans le quotidien des enfants, ceux-ci leur perçoivent une certaine utilité, même si elles n'expliquent pas parfaitement la réalité. À l'opposé, les concepts scientifiques sont moins familiers pour les élèves. Ils sont peu utilisés et mobilisés, si ce n'est que dans la salle de classe. Pour Potvin et Cyr (2017), les élèves doivent devenir assez familiers avec les concepts scientifiques pour pouvoir les utiliser rapidement, facilement et peut-être de manière plus intuitive. Cette idée suggérant qu'un concept appris pourrait éventuellement devenir intuitif, notamment chez les experts pour qui les connaissances sont très automatisées, est également évoquée dans les recherches portant sur le raisonnement logique (Bago et De Neys, 2017, 2019). Dans la section qui suit, la variable *familiarité* sera discutée au regard de différentes disciplines, puis sera définie plus opérationnellement à l'aide d'indicateurs qui permettront d'évaluer le niveau de *familiarité* de différentes conceptions intuitives.

2.2.1.2 *Familiarité* : recension et définitions

Dans le langage courant et dans les dictionnaires francophones, la *familiarité* réfère à deux réalités différentes. D'abord, la *familiarité* est définie comme « l'intimité née de rapports constants entre deux personnes, mais aussi entre une personne et une œuvre, par suite d'une longue habitude » (Dictionnaire Larousse, 2021). Des synonymes courants de *familiarité* sont la camaraderie, la cordialité et la privauté (Dictionnaire Larousse, 2021; Dictionnaire Le Robert, 2021). La *familiarité* est également définie comme

une « habitude, [une] connaissance parfaite de quelque chose, qui s'acquiert par l'usage, l'expérience » (Dictionnaire Larousse, 2021), ce qui se rapproche davantage du sens que cette recherche donnera à la *familiarité*.

Kahneman (2011), un chercheur connu pour ses travaux sur la pensée intuitive, associe la *familiarité* à l'aisance cognitive. Pour Kahneman (2011), la *familiarité* mène à une façon plus superficielle de penser et à une sensation de facilité qu'il associe au *Système 1*. Par exemple, il est documenté que le simple fait d'être exposé fréquemment à une liste de mots, même s'ils n'ont aucun sens ou s'ils sont incompréhensibles, leur confère une certaine *familiarité* due à l'effet d'exposition (Zajonc, 1968). Dans un même ordre d'idées, une étude surprenante a mis en évidence que l'exposition à une liste de mots contenant des prénoms fictifs peut mener à une impression de connaître ces gens, ou même à penser qu'ils sont célèbres, quand ils sont ensuite vus dans un autre contexte (Jacoby *et al.*, 1993). Dans le domaine des finances, il semble que dès leur entrée en bourse, les compagnies qui ont des appellations faciles à prononcer affichent de meilleures performances que celles qui ont des noms difficiles à prononcer (Alter et Oppenheimer, 2006; Pensa, 2006). Ceci s'explique possiblement par cette impression de *familiarité* associée aux appellations plus simples.

En philosophie, la *familiarité* est associée à ce qu'il convient d'appeler des biais de raisonnement. Ceux-ci font référence à des erreurs dans lesquelles l'intuition et la *familiarité* l'emportent sur la logique et les probabilités. Par exemple, Tversky et Kahneman et (1973) se sont intéressés à des énoncés impliquant des stéréotypes du type « Steve est très timide et renfermé, toujours serviable, mais peu intéressé par le monde réel. Il a un besoin d'ordre et de structure et se passionne pour les détails. Quelle est la probabilité qu'il pratique tel ou tel métier ? » (traduction libre). Les participants à qui ce genre d'énoncé était présenté étaient susceptibles d'ignorer les probabilités statistiques (par ex. il y a beaucoup plus d'agriculteurs que de bibliothécaires aux États-Unis; conséquemment, il est plus probable que Steve soit agriculteur que bibliothécaire) au profit de leur logique intuitive.

En psychologie cognitive, la *familiarité* est définie comme un : « état cognitif accompagnant la reconnaissance perceptive ou mnésique. Il se caractérise par sa survenue automatique, non consciente, son caractère irrépessible et son évidence phénoménologique particulière » (Dictionnaire des sciences cognitives, 2002, p. 131). Il est à noter que cette définition se rapproche beaucoup de celle des conceptions intuitives en sciences qui surviennent, elles aussi, de manière automatique et non consciente. Des

recherches portant sur la mémoire qui utilisent la neuroimagerie et qui s'intéressent à la théorie des doubles processus (« *dual-process theories* ») ont tenté d'établir des corrélations entre ce qui est familier, intuitif et perceptif et ce qui l'est moins. Ces théories postulent que les jugements de reconnaissance (i.e. lorsqu'un stimulus, connu ou non, est présenté à une personne) peuvent être basés sur deux types d'information distincts : la *familiarité* et le souvenir. Les travaux de Curran (2000) mettent en évidence que lorsqu'une information de nature familière, similaire à ce qui est connu, est présentée à un individu, il est possible de détecter une variation de l'activité cérébrale à la composante FN-400 entre 300 et 500 ms après la présentation de ladite information. Par contre, lorsque l'information présentée implique de la nouveauté, des informations spécifiques ou fait appel à un souvenir (« *recollection* »), des activations plus marquées dans les zones pariétales sont détectées entre 400 à 800 ms après la présentation des items (Curran, 2000). Ces différences, tant au niveau des délais d'activation que des zones cérébrales qui s'activent, mettent en évidence que des modèles distincts caractérisent l'activité cérébrale des individus en fonction du type d'information qui leur est présentée, soit une information familière ou un souvenir (pour une revue, voir Curran *et al.*, 2006). D'autres études arrivent à ces mêmes conclusions (Geurten *et al.*, 2021; Rosburg *et al.*, 2011).

Par ailleurs, la *familiarité* n'est pas un concept ou une variable qui semble avoir été étudié directement en sciences de l'éducation. Ce concept ne fait l'objet de définitions, ni dans le Dictionnaire actuel de l'éducation (Legendre, 2005), ni dans le Dictionnaire de l'éducation (Van Zanten et Rayou, 2017), ni dans le Dictionnaires Pédagogie, dictionnaire des concepts clés (Raynal et Rieunier, 2014). Également, bien que la *familiarité* ait été documentée dans le contexte de recherches en psychologie cognitive portant sur la mémoire (Claparède, 1911; Cowan, 2000; Gardiner et Java, 1993; Jacoby *et al.*, 1993), elle ne l'a pas été dans le contexte de recherches portant spécifiquement sur le contrôle inhibiteur. En ce sens, la *familiarité* est donc un concept que cette recherche empruntera aux sciences cognitives et à la psychologie cognitive dans le but d'étudier l'effet que cette variable peut avoir sur la mobilisation du contrôle inhibiteur au regard des apprentissages en sciences.

Il est à noter qu'ici, un paradoxe émerge des écrits : il semble que la *familiarité* puisse avoir des effets positifs ou facilitants sur l'apprentissage, bien que l'inverse est aussi possible (Geurten *et al.*, 2021). En effet, quand l'élève est en mesure d'établir un lien entre un concept scientifique et son application dans la vie courante, cela peut contribuer à en faciliter l'apprentissage puisque celui-ci devient plus familier (Bahar et Polat, 2007; Millar, 1991). En outre, une quantité illimitée d'informations familières peuvent être

encodées dans la mémoire à long terme et celles-ci ont l'avantage d'être manipulées plus facilement par la mémoire de travail que les informations moins familières (Sweller *et al.*, 2019). Ainsi, quand un élève est exposé tôt à des concepts scientifiques dans son parcours scolaire, ceux-ci auront l'avantage d'être familiers, peut-être même d'être plus familiers que les conceptions intuitives (Potvin, 2013; Potvin et Cyr, 2017), ce qui représente un avantage pour l'élève. Cependant, à l'opposé, vouloir rendre certains concepts scientifiques trop familiers peut mener à des dérives. Par exemple, pour se représenter plus facilement certains concepts abstraits, les novices en physique ont tendance à penser les concepts physiques en tant qu'entités matérielles (Reiner *et al.*, 2000). Ainsi, des élèves pourraient penser qu'un objet en mouvement « perd sa force » puisqu'il l'a entièrement utilisée. En fait, une information qui est familière paraît plus valable et crédible aux yeux d'une personne qu'une autre information qui l'est moins (Gigerenzer et Todd, 2001).

Parmi les facteurs pouvant contribuer à la *familiarité* d'une conception intuitive dans le contexte de l'apprentissage des sciences, certains auteurs évoquent des éléments relatifs à la quotidienneté (Allaire-Duquette *et al.*, 2021; Brault Foisy *et al.*, 2021, en révision; Skelling-Desmeules *et al.*, 2021; Solomon, 1983). Par exemple, dans le cas de la conception intuitive « ce qui bouge est vivant », il est possible d'observer et d'expérimenter cette conception à l'aide de nos sens, sans aucune préparation particulière et sur une base quotidienne. L'expérience du vivant se produit en ce sens d'elle-même. Plusieurs autres phénomènes sont susceptibles de se produire spontanément et fréquemment dans la vie quotidienne. Chaque jour, les enfants sont témoins du cycle du jour et de la nuit et sont en contact avec des objets qui tombent, qui se déplacent ou qui roulent. Les enfants observent quotidiennement les paysages de leur environnement et la température qu'il fait (Mogk et Goodwin, 2012). Un mécanisme souvent évoqué pour expliquer pourquoi ce qui se répète régulièrement a tendance à devenir très persistant et résistant au plan cérébral est celui de la neuroplasticité : « les neurones qui s'activent ensemble se connectent ensemble » (Hebb, 1949). Effectivement, les connexions neuronales qui sont souvent utilisées deviennent extrêmement robustes puisque la répétition renforce la probabilité de réactivation, même spontanée. Plus globalement, la fréquence de répétition et la récence semblent également agir sur la *familiarité* (Béna *et al.*, 2019).

D'autres auteurs évoquent que des éléments relatifs à la prévalence socioculturelle des conceptions intuitives pourraient contribuer à leur *familiarité* (Renouard et Mazabraud, 2018; Solomon, 1983, 1987). À cet égard, la possibilité pour l'élève d'être exposé à des conceptions à travers ses interactions sociales,

les médias ou l'actualité pourrait contribuer à rendre ces conceptions plus familières (Solomon, 1983). Par exemple, en 2020, il a été montré que les enfants ont élaboré plusieurs conceptions relatives au coronavirus en l'espace de quelques semaines, alors que cette maladie leur était totalement inconnue auparavant (Caulfield, 2020). Dans le même ordre d'idées, des mythes communs et répandus, des histoires, des films populaires peuvent aussi être associés à certaines conceptions, leur conférant ainsi une plus grande *familiarité*. Par exemple, certaines émissions de télévision connues des enfants véhiculent des conceptions erronées sur la nature même de la science, suggérant que la science implique automatiquement un sarrau et des lunettes, de la magie ou des maquettes de volcans en éruption. Dans le même ordre d'idées, les films de science-fiction populaires respectent rarement les lois de la physique. En outre, il semble que le visionnement d'un seul film de ce type peut contribuer à développer ou à renforcer les conceptions intuitives (Barnett *et al.*, 2006). En fait, les enfants baignent dans les conceptions intuitives puisque celles-ci semblent profondément enracinées dans toute la société (Solomon, 1983). Pour Renouard et Mazabraud (2019), les interactions sociales sont ce qui contribue le plus à la persistance des conceptions intuitives. Ces chercheurs suggèrent même d'intervenir sur les interactions sociales des élèves plutôt que sur leurs conceptions intuitives. Ainsi, ils suggèrent qu'intervenir sur les interactions pourrait avoir, indirectement, un effet sur leur capacité à inhiber leurs conceptions intuitives.

Certaines conceptions intuitives semblent également familières pour les élèves en raison du vocabulaire qui est employé. Effectivement, certains mots peuvent être particulièrement familiers sur le plan sémantique pour les élèves, c'est-à-dire qu'ils font partie de leur vocabulaire usuel, bien que le sens qu'ils associent à ce mot diffère souvent de sa définition scientifique (Johnstone, 1991). Ainsi, plusieurs travaux de recherche se sont penchés sur cette problématique et ont recensé une centaine de mots familiers dont le sens n'est pas le même dans le langage courant en anglais et dans le langage scientifique (Cassels et Johnstone, 1985; Coxhead et Hirsch, 2007; Johnstone, 1985; Johnstone et Selepeng, 2001; Marshall *et al.*, 1991). Par exemple, « a simple word like 'pure' (clean or safe) takes on a new meaning in chemistry. 'Mass' (a lot, or even a religious service) becomes something different in physics. 'Concept or conception' in some circumstances is an idea, but in others it is connected to birth » (Johnstone et Selepeng, 2001, p. 19). Ces recherches ont été menées en anglais, mais il est probable que les résultats auraient été similaires si elles avaient été réalisées en français. Le problème est encore plus prononcé quand des mots très familiers et peu complexes, que les élèves pensent maîtriser, sont utilisés (Cassels et Johnstone, 1983). Par exemple, dans le langage familier, une étoile est un petit point blanc dans le ciel que l'on peut observer la nuit et le Soleil est une grosse boule de feu qui s'observe le jour. Dans les faits, le Soleil est une étoile parmi tant

d'autres, il a une taille moyenne et il brille constamment (Thouin, 2017). Il semble que la *familiarité* sémantique pose problème également chez les étudiants universitaires : même au baccalauréat en physique, il y a un grand écart entre le sens que les étudiants attribuent à une terminologie et sa véritable définition (Jacobs, 1989). Enfin, le vocabulaire employé pour certaines conceptions est associé à des expressions familières dont le sens figuré est susceptible d'induire les élèves en erreur : décrocher la lune, avoir mal au cœur, etc. Ainsi, par leur définition usuelle, certains mots sont susceptibles d'orienter les élèves vers une mauvaise piste (Solomon, 1983).

Qui plus est, l'intuitivité, c'est-à-dire l'ensemble des critères relatifs au caractère intuitif des conceptions, peut contribuer à rendre une conception plus familière. Effectivement, l'explication de certains phénomènes est le produit d'un raisonnement qui paraît d'une grande évidence pour la personne qui raisonne, qui va de soi (« *self-evident* », Fischbein, 1987). Souvent, il n'est pas nécessaire de recourir à une explication complète pour expliquer un phénomène puisque le sens commun (« *common sense* ») suffit pour l'expliquer. Par exemple, quand un enfant pousse un objet, celui-ci avance et quand il arrête de pousser, l'objet cesse d'avancer. L'enfant n'a pas besoin d'aller plus loin dans son raisonnement. À cet égard, Stavy et Tirosh (2000) se sont intéressés aux règles intuitives qui influencent le raisonnement en sciences et en mathématiques. Pour ces auteurs, plusieurs conceptions intuitives spécifiques découleraient en fait de règles intuitives plus générales. L'une de ces règles intuitives documentées est « plus de A, plus de B » (Stavy *et al.*, 2002). Effectivement, dans des tâches qui impliquent la comparaison de deux objets dont la saillance diffère, les élèves ont tendance à répondre en leur accordant tout de même la même importance. Par exemple, face à un problème scientifique de ce type : « Deux solutions contenant du sucre et de l'eau sont préparées devant un enfant. La solution 1 est préparée en mélangeant une cuillère à café de sucre dans une tasse d'eau. La solution 2 est préparée en mélangeant une cuillère à café de sucre de la même taille dans une demi-tasse d'eau. Quelle est la solution la plus sucrée ? » (Babai *et al.*, 2006), les élèves auront tendance à répondre que la solution ayant le plus d'eau (« plus de A ») est la solution la plus sucrée (« plus de B »), même si ceci est faux. Des réponses intuitives du type « plus de A, plus de B » sont observées dans de nombreuses tâches de comparaison impliquant des concepts scientifiques variés, tels que la masse, le volume, la matière, la densité, la température et la chute libre (Babai *et al.*, 2006).

Enfin, un dernier élément qui ressort des écrits concerne l'ensemble des critères relatifs à l'utilité des conceptions, telle que perçue par l'élève. Les travaux de Potvin (2013, 2017, 2018) décrivent de façon

récurrente cette impression d'utilité, notamment en évoquant le statut de crédibilité d'une conception ainsi que le sentiment de certitude qu'un apprenant peut éprouver face à celle-ci (Potvin et Cyr, 2017). Pour Ohlsson (2009), les diverses conceptions se font compétition au regard de leur utilité cognitive pour expliquer un phénomène. Pour reprendre l'exemple des conceptions intuitives qui découlent de la règle « Plus de A, plus de B », celles-ci peuvent s'avérer utiles : savoir que « plus je suis près du feu, plus c'est chaud » peut contribuer positivement à la sécurité des enfants, mais peut aussi mener à un raisonnement erroné du type « l'été, il fait plus chaud, car la Terre est plus près du Soleil ». Ainsi, plusieurs conceptions intuitives sont utiles parce qu'elles permettent de produire des explications qui apparaissent suffisamment efficaces à des phénomènes familiers (Millar, 1991; Ohlsson, 2009). Par exemple, quand un parent demande à son enfant de fermer la porte pour éviter que le froid « entre » dans la maison, cela suppose à tort que le froid « existe » au même titre qu'une personne, mais cette explication est par ailleurs suffisante pour comprendre qu'une porte fermée isolera mieux la maison. En fait, dans certains cas, une explication non scientifique permet de parvenir à la bonne conclusion plus facilement que la conception scientifique (Millar, 1991). Ohlsson (2009) et Millar (1991) évoquent tous les deux l'idée d'une compétition et d'une analyse coût/bénéfice : dans la mesure où les conceptions intuitives sont suffisantes pour connaître du succès dans la vie courante, il n'y a pas d'utilité à apprendre des concepts scientifiques.

En somme, il semblerait que l'obstacle que causent les conceptions intuitives dans l'apprentissage et le raisonnement scientifique soit encore plus important si ces dernières présentent une *familiarité* élevée pour les élèves. Dans le cadre de ce mémoire, la *familiarité* fera donc référence à l'ensemble des critères relatifs à la quotidienneté, à la prévalence socioculturelle, à la familiarité sémantique, à l'intuitivité et à l'utilité des conceptions intuitives. Ces éléments qui semblent caractériser la *familiarité* des conceptions intuitives émergent d'une recension des écrits, et paraissent assez opérationnels pour permettre une évaluation ultérieure du niveau de *familiarité* des conceptions intuitives auxquelles il faut résister. Une conception intuitive pourrait donc être associée à un niveau de *familiarité* allant de faible à élevé, en fonction des critères énumérés ci-haut. Ainsi, la *familiarité* semble être une première variable didactique susceptible d'influencer la mobilisation du contrôle inhibiteur. Une deuxième variable didactique, relative cette fois aux concepts scientifiques, pourrait également influencer la quantité de contrôle inhibiteur requise.

2.2.2 *Complexité* des concepts scientifiques

Cette partie du cadre théorique présente la deuxième variable didactique de cette étude, soit la *complexité* des concepts scientifiques. D'abord, la discipline « sciences » sera définie, comme généralement entendu dans les programmes scolaires à l'enseignement primaire. Ensuite, la variable *complexité* sera explorée au regard d'autres disciplines et contextes, puis sera définie plus opérationnellement à l'aide de critères relatifs au niveau d'abstraction, à la charge cognitive, à la complexité sémantique et à la complexité contextuelle qui sont associées aux concepts scientifiques que les élèves doivent apprendre. Des exemples de concepts scientifiques issus des cursus scolaires au primaire et qui ont des niveaux variés de *complexité* seront mis en relation avec chacun des critères énumérés ci-haut.

Au primaire, les programmes en sciences regroupent généralement des concepts issus de plusieurs disciplines scientifiques, tous regroupés sous l'appellation disciplinaire « sciences » (TIMSS Encyclopedia, 2015). Ainsi, la discipline « sciences » implique l'apprentissage de concepts qui concernent principalement la biologie, la physique, la chimie et les sciences de la Terre (Thouin, 2017). Des éléments issus d'autres disciplines, telles que la géologie, la technologie, la santé et la botanique font partie également des programmes scolaires scientifiques (TIMSS Encyclopedia, 2015). Ainsi, dès le primaire, les programmes scientifiques comportent une quantité importante de contenus à apprendre (Potvin, 2013), dont plusieurs concepts scientifiques issus de disciplines scientifiques variées. Certains auteurs évoquent que le curriculum en sciences au primaire a peu changé en 100 ans, comparativement à celui des niveaux supérieurs, dont les contenus semblent davantage influencés par les avancées technologiques récentes (Kovalik et Olsen, 2010). Thouin (2017) décrit les concepts scientifiques à apprendre au primaire « comme des représentations mentales générales et abstraites permettant d'organiser et de simplifier les perceptions et les connaissances, par exemple les concepts de cellule, d'organisme, de température, de temps, de densité ou de pression. Contrairement à plusieurs concepts du langage courant, un concept scientifique peut être formulé selon divers niveaux » (Thouin, 2017, p. 39).

Plusieurs concepts scientifiques sont reconnus comme étant particulièrement difficiles à apprendre (Johnstone, 1991). En plus d'être difficiles en raison des conceptions intuitives qui leur sont associées et auxquelles l'élève doit résister, ils peuvent aussi l'être en raison des contenus d'apprentissage qui sont eux-mêmes particulièrement complexes. Face à ce constat, une étude menée auprès de 300 élèves de la 6^e année jusqu'en 2^e secondaire a tenté de cibler quels étaient les apprentissages scientifiques perçus comme étant les plus difficiles et les plus complexes par les élèves et par les enseignants. Les résultats

montrent que les concepts les plus difficiles à maîtriser seraient relatifs à la physique, suivis par ceux portant sur le vivant (Bahar et Polat, 2007). De manière similaire, Chi (2005) suggère que des concepts en physique, tels que la lumière, la chaleur et le courant électrique, soient difficiles à apprendre. Comme les concepts liés à la physique et à la biologie sont au cœur des programmes scolaires dès le primaire, il est possible de penser que les élèves sont confrontés à des apprentissages scientifiques complexes très tôt dans leur parcours scolaire. En résumé, une variété importante de concepts, issus de plusieurs disciplines scientifiques, font partie des programmes scolaires officiels. Dès l'âge de 6 ans, les élèves du primaire doivent acquérir une bonne compréhension de plusieurs concepts scientifiques qui touchent notamment la physique et la biologie, des disciplines réputées pour leur haut niveau de *complexité* (Bahar et Polat, 2007; Chi, 2005).

Dans le langage courant, la *complexité* peut être définie comme le « caractère de ce qui est complexe, qui comporte des éléments divers qu'il est difficile de démêler » (Dictionnaire Larousse, 2021) et comme l'« état, [le] caractère de ce qui est complexe; synonyme : complication, difficulté » (Dictionnaire Le Robert, 2021). Le mot difficulté semble souvent recensé comme un synonyme du mot *complexité*, tandis que le mot simplicité en serait l'antonyme. Au plan sémantique, le concept de *complexité* appartient au champ lexical du chaos et de l'émergence (Raynal et Rieunier, 2014). Il est intéressant de mentionner que le mot *complexité* n'était pratiquement pas utilisé avant 1850 et ce n'est qu'à partir de 1950 que son usage s'est amplifié de manière importante, et ce, jusqu'au début des années 2000 (Dictionnaire La langue française, 2022).

En philosophie, le concept de *complexité* réfère surtout à la complexité des systèmes (Morin et Moigne, 1999). Pour ces penseurs, la *complexité* implique notamment l'interaction entre plusieurs faits et plusieurs phénomènes sociaux. Pour d'autres auteurs, il semble que bien que le concept de *complexité* existe, il ne soit pas possible de définir de façon concise ce qui rend quelque chose complexe (Ladyman *et al.*, 2013). Pour définir la *complexité*, le dictionnaire *Pédagogie, dictionnaire des concepts clés*, mentionne que « les systèmes complexes sont des systèmes dont les éléments se modifient en fonctionnant, car ils sont soumis à des règles de rétroactions multiples (...) L'imprévisibilité est l'une des caractéristiques principales des systèmes complexes (...) la vie, le développement du cerveau, le développement d'un individu, la vie d'une classe constituent des exemples de la complexité » (Raynal et Reunier, 2014, p 143). En psychologie cognitive, la *complexité* est associée à l'interactivité des éléments, c'est-à-dire qu'elle résulte d'une combinaison entre la nature des informations à traiter et l'expertise de la personne qui les traite (Sweller

et al., 1998, 2019). Ainsi, un apprentissage pourrait être très complexe pour un élève et peu complexe pour un autre. Un apprentissage pourrait être très complexe à un moment précis et peu complexe plus tard. En éducation, la *complexité* est définie simplement par le « caractère, [la] nature de ce qui comprend un grand nombre d'éléments et de relations entre ces derniers. Antonyme : simplicité » (Legendre, 2005, p. 259). Par ailleurs, ne serait-ce qu'en considérant le temps que cela prend et tous les efforts personnels que cela implique, force est d'admettre qu'apprendre est très souvent complexe (Potvin, 2013).

Curieusement, il semble que peu d'articles récents en sciences de l'éducation associent directement la *complexité* aux sciences, et ce, même s'il est admis que les sciences sont complexes et difficiles à apprendre (Bahar et Polat, 2007; Johnstone, 1991; Millar, 1991). En fait, les articles scientifiques récents associent la *complexité* à acquérir une compréhension suffisante des concepts scientifiques et à la difficulté d'inhiber ses conceptions intuitives (Vosniadou, 2020). Néanmoins, quelques ouvrages en didactiques des sciences font état de certaines caractéristiques propres aux sciences qui peuvent aider à définir ce qu'est la *complexité* et à caractériser ce qui pourrait contribuer à la *complexité* d'un concept scientifique. Quelques articles scientifiques font également état de la *complexité* des concepts scientifiques à apprendre (Millar, 1991), mais ils sont moins récents. Ces articles, notamment ceux du didacticien Johnstone (1982, 1991, 1997), apportent tout de même un éclairage pertinent à la définition de la *complexité*. En outre, tous ces écrits font émerger quatre critères, qui seront détaillés ci-après, permettant de définir la *complexité* d'un concept scientifique, soit son niveau d'abstraction, sa charge cognitive, sa *complexité* sémantique et sa *complexité* contextuelle.

Un élément couramment associé à la *complexité* des concepts scientifiques à apprendre est leur niveau d'abstraction (Johnstone, 1991; Millar, 1991). De prime abord, la science est basée sur des théories de grande envergure et sur un ensemble de lois qui tentent d'expliquer comment fonctionne le monde (Johnstone, 1991; Millar, 1991). Il n'existe aucun moyen sensoriel d'accéder à tout cela concrètement. En ce sens, certains concepts sont très difficiles à apprendre pour les jeunes enfants, notamment parce qu'ils ne peuvent être manipulés directement. C'est notamment le cas des concepts de force et d'énergie qui sont invisibles; les élèves peuvent voir les effets d'une force ou d'une source d'énergie, mais ils ne peuvent pas les manipuler en tant que tels (Thouin, 2017). D'autres concepts, comme la sublimation, la photosynthèse ou la chaîne alimentaire présentent également un niveau d'abstraction assez élevé (Thouin, 2017). Certains auteurs évoquent que lorsqu'ils tentent de comprendre un concept abstrait comme la chaleur, les élèves ont donc tendance à attribuer à la chaleur des caractéristiques que l'on attribue

habituellement aux substances, comme le fait d'être bloquée ou piégée (Reiner *et al.*, 2000), ce qui contribue davantage à faire émerger des conceptions intuitives qu'à renforcer l'explication scientifique. En fait, si les sciences étaient tangibles, elles seraient moins abstraites, donc moins complexes (Johnstone, 1991). En classe, de petites expériences tentent de rendre certains concepts plus tangibles et moins abstraits, mais la réalité est que le résultat observable de ces expérimentations ne représente qu'une infime partie d'un phénomène scientifique ou de ce que l'enseignant cherche à transmettre à ses élèves (Johnstone, 1991). Bien qu'il soit possible d'observer des images, de dessiner des croquis ou d'écouter des vidéos pour rendre certains concepts moins abstraits, comme l'intérieur de la Terre ou la structure d'une pyramide, il n'en demeure pas moins que plusieurs autres concepts ne peuvent l'être et c'est d'autant plus vrai en ce qui a trait aux théories scientifiques. Par exemple, les enfants ne peuvent pas manipuler des théories comme la théorie de l'évolution (Ronfard *et al.*, 2021). Pourtant, ces concepts et théories se trouvent dans les programmes scolaires au primaire. De plus, pour représenter certains phénomènes, il est nécessaire de recourir à un langage symbolique, notamment en ayant recours à des analogies (Duit, 1991), une stratégie pédagogique intéressante, mais qui comporte aussi des limites importantes. Il existe aussi des concepts scientifiques qui sont abstraits au point d'être difficiles à distinguer conceptuellement entre eux. Par exemple, les concepts d'éléments, d'atomes et de molécules réfèrent tous à quelque chose d'invisible à l'œil nu, mais sont pourtant des concepts différents. Dans un même ordre d'idées, deux substances peuvent avoir des apparences semblables malgré une nature complètement différente, comme c'est le cas de l'eau et du vinaigre. Le niveau d'abstraction d'un concept semble donc contribuer à la *complexité* de celui-ci.

Un modèle qui pourrait être utilisé pour représenter l'abstraction qui sous-tend la *complexité* des concepts à apprendre est le modèle de la pensée multiniveaux (« *multilevel thought* », Johnstone, 1982). Ce modèle est représenté par un triangle et un niveau de pensée est associé à chaque pointe : le macrophénomène ou l'invisible, le microphénomène et le symbolique. Ainsi, un concept qui fait appel aux trois niveaux de pensée est plus abstrait et plus complexe qu'un concept qui fait appel à un seul niveau de pensée. Pour Johnstone (1982, 1991), ce modèle s'utilise dans le contexte de toutes les disciplines scientifiques. Il est possible de penser que ce modèle pourrait aider un enseignant à identifier les concepts qui revêtent un plus haut niveau de *complexité* puisque le fait de devoir se concentrer sur plusieurs niveaux de conceptualisation peut contribuer à rendre les apprentissages difficiles (Wilensky et Resnick, 1998).

Qui plus est, le fait de devoir jongler avec trois niveaux de pensée à la fois, ou encore, avec plusieurs concepts à la fois, peut engendrer une charge cognitive importante pour l'élève au point de causer une surcharge de sa mémoire de travail (Baddeley, 1994; Johnstone, 1991, 1997). Certains concepts, notamment les circuits électriques, demandent pour leur part de comprendre plusieurs concepts sous-jacents (électrons, charge, etc.) afin de pouvoir bien maîtriser ledit concept. Un autre exemple concerne la flottabilité : pour expliquer pourquoi un objet a davantage tendance à flotter ou à couler, l'élève doit faire appel simultanément aux concepts de masse et de volume. Pour comprendre et expliquer le cycle des saisons, les élèves doivent pouvoir se représenter simultanément l'inclinaison de la Terre, sa révolution et la manière dont les rayons du Soleil sont dirigés sur la Terre (Thouin, 2017). Il importe de souligner que de devoir manipuler tous ces éléments à la fois peut être très exigeant sur le plan cognitif pour l'enfant (Cowan, 2000), ce qui pourrait avoir comme effet de rendre les concepts à apprendre plus complexes. Certains auteurs vont plus loin en mentionnant que dans le contexte de l'apprentissage des sciences, une phrase inconnue, voire un seul mot difficile, peut occuper une quantité d'espace importante dans la mémoire de travail, ce qui laisse beaucoup moins d'espace disponible pour bien comprendre le concept scientifique à apprendre (Johnstone, 1991). Les lettres et les signes qui sont utilisés pour symboliser les concepts peuvent aussi alourdir la charge cognitive associée à l'apprentissage d'un concept (Cassels et Johnstone, 1983; Johnstone, 1991; Johnstone et Selepeng, 2001). Plusieurs études mettent d'ailleurs en évidence que la mémoire de travail peut maintenir et manipuler une quantité limitée d'éléments (Cowan, 2000). Au-delà d'un certain seuil, un désengagement cérébral marqué est observé (Pinotsis *et al.*, 2019; Price *et al.*, 1992; van Snellenberg *et al.*, 2015), ce qui se traduit par un abandon cognitif de la tâche. Autrement dit, quand sa mémoire de travail est surchargée, l'élève se désengage de ce qu'il était en train de faire, que ce soit écouter les explications de son enseignant ou résoudre un problème écrit. Ainsi, apprendre un concept scientifique qui nécessite de faire appel à plusieurs niveaux de conceptualisation, de tenir compte de plusieurs concepts ou variables simultanément ou faire un grand nombre de manipulations épistémiques pour rendre un concept intelligible pourrait être associé à une grande charge cognitive, ce qui peut contribuer au niveau de *complexité* du concept à acquérir.

Un autre élément fréquemment invoqué dans la littérature scientifique réfère à la complexité sémantique (Bahar et Polat, 2007; Coxhead *et al.*, 2010; Garthwaite *et al.*, 2014; Glynn et Muth, 1994; Henderson et Wellington, 1998; Millar, 1991; Snow, 2010; Thouin, 2017; Uno et Bybee, 1994). D'abord, le vocabulaire scientifique est difficile et différent du langage courant (Millar, 1991). En fait, l'apprentissage des sciences implique l'utilisation de mots spécifiques (Coxhead *et al.*, 2010) qui ne sont pas fréquents dans la langue

usuelle. Par exemple, dans un texte scientifique, il peut y avoir de 2 à 3 mots spécifiques pour chaque ligne de texte (Coxhead *et al.*, 2010). De ce fait, l'acquisition d'un vocabulaire spécifique pour bien se représenter et comprendre les phénomènes et les concepts scientifiques est incontournable. Par ailleurs, ce ne sont pas tous les élèves qui réussissent à expliquer un phénomène scientifique avec le même niveau d'expertise et le niveau de leurs explications peut varier d'un phénomène à un autre (Garthwaite *et al.*, 2014; Uno et Bybee, 1994). Lors d'entretiens individuels menés auprès d'élèves et d'enseignants, tant les élèves que les enseignants ont déclaré que le langage scientifique est un obstacle dans l'apprentissage et l'enseignement des sciences (Bahar et Polat, 2007). Pour Johnstone et Selepen (2001), la problématique associée à la mauvaise compréhension du langage scientifique n'a pas changé et n'a pas disparu au fil des ans. Chez les élèves qui apprennent les sciences dans une langue seconde, le niveau de complexité sémantique serait encore plus élevé (Bahar et Polat, 2007; Snow, 2010). Ainsi, il semblerait que 20 % de leur capacité à comprendre et à raisonner serait mobilisée par la langue d'enseignement plutôt que par les concepts scientifiques à apprendre (Johnstone et Selepen, 2001). En outre, le langage scientifique implique aussi une écriture symbolique, incluant l'utilisation de formules mathématiques (Cassels et Johnstone, 1985; Johnstone et Selepen, 2001; Millar, 1991), ce qui contribuerait à complexifier l'apprentissage des sciences pour 9 élèves sur 10 (Bahar et Polat, 2007). Plus l'élève avance dans son parcours scolaire, plus il sera appelé à développer une logique argumentaire basée sur un langage scientifique complexe et abstrait (Millar, 1991) puisque le recours à une terminologie complexe et dense ainsi que l'utilisation de mots précis et riches en signification font partie intégrante des sciences. La compréhension de cette terminologie est essentielle pour que l'élève devienne autonome dans ses apprentissages en sciences (Snow, 2010).

Un dernier critère pouvant contribuer à la *complexité* d'un concept scientifique est la complexité contextuelle, c'est-à-dire l'ensemble des critères relatifs aux contextes dans lesquels sont mobilisés les concepts scientifiques. Des élèves interrogés soulèvent en effet qu'il est difficile de faire le lien entre les connaissances des cours de sciences et la vraie vie, et encore plus, d'utiliser les connaissances acquises dans les cours de sciences dans des situations courantes de la vraie vie puisque certains apprentissages sont complètement décontextualisés (Bahar et Polat, 2007). L'absence de contexte d'application concret contribue donc à rendre certains apprentissages complexes. Par ailleurs, certains contextes pédagogiques mis en place par les enseignants du primaire semblent plus propices à l'apprentissage des sciences que d'autres, ce qui a pour effet de susciter davantage l'engagement des élèves et les apprentissages scientifiques (Glynn et Winter, 2004; Sears, 2002). Par exemple, des contextes pédagogiques comme la

démarche d'investigation, l'apprentissage par problèmes, l'apprentissage coopératif et l'apprentissage par projets (Glynn et Winter, 2004) sont susceptibles de rendre les concepts scientifiques moins complexes. Ces contextes pédagogiques font aussi en sorte que les élèves font des liens entre les concepts appris et différents contextes authentiques de leur vie sociale, familiale et citoyenne. Par contre, même en misant sur des approches visant à fournir un contexte d'apprentissage authentique et engageant, le contexte propre à certains types de tâches, à certains concepts précis ou à certains problèmes à résoudre peut tout de même avoir un niveau de *complexité* élevé. Par exemple, la résolution de certains problèmes scientifiques implique souvent de maîtriser plusieurs concepts à la fois. Certains concepts sont souvent associés à des types de problèmes qui comportent un grand nombre d'étapes pour parvenir à la solution (Jonassen et Hung, 2015), comme c'est souvent le cas des problèmes portant sur la transformation de l'énergie ou sur le fonctionnement d'un circuit électrique. Les élèves sont confrontés à ce type de contexte vers l'âge de 10 ans (Gouvernement du Québec, 2006a). Parfois, la mise en application d'un concept dans un contexte donné requiert un grand nombre de sauts logiques, ou encore, que l'élève adopte une perspective complètement différente de la sienne, ce qui est notamment le cas pour les concepts liés à l'astronomie (Bower, 2017). En fait, les problèmes à résoudre sont rarement équivalents en termes de *complexité* puisque dans les salles de classe, ceux-ci sont souvent conçus par les enseignants qui jaugent de leur difficulté en fonction de leur propre expérience professionnelle (Jonassen et Hung, 2015). Le réel niveau de *complexité* du problème est parfois perçu a posteriori, une fois que l'enseignant a évalué la performance de ses élèves. Les différents contextes dans lesquels les connaissances des élèves sont mobilisées sont donc susceptibles de contribuer au niveau de *complexité* d'un concept scientifique puisque certains contextes sont systématiquement plus complexes que d'autres.

En somme, il semblerait que l'obstacle que cause l'apprentissage de concepts scientifiques soit encore plus important si ces derniers présentent un niveau de *complexité* élevé pour les élèves. Dans le cadre de ce mémoire, quatre critères ont été retenus pour définir et caractériser la *complexité*, soit le niveau d'abstraction, la charge cognitive, la complexité sémantique et la complexité contextuelle des concepts scientifiques. Ces critères émergent d'une recension des écrits, et apparaissent suffisamment opérationnels pour permettre l'évaluation ultérieure du niveau de *complexité* des concepts scientifiques à apprendre. Un concept scientifique pourrait donc être associé à un niveau de *complexité* allant de faible à élevé, en fonction des critères énumérés ci-haut. Également, plusieurs concepts scientifiques complexes interfèrent avec des conceptions intuitives qui peuvent avoir une *familiarité* allant de faible à élevé pour l'élève. Conséquemment, la *familiarité* des conceptions intuitives **et** la *complexité* des concepts

scientifiques, respectivement liées au Système 1 et au Système 2, semblent être des variables didactiques susceptibles d'influencer la mobilisation du contrôle inhibiteur (Système 3) lors d'apprentissages scientifiques. En effet, plus une conception intuitive est familière, plus il peut être difficile pour l'élève d'y résister. Il devra possiblement mobiliser davantage son contrôle inhibiteur pour y parvenir. Également, plus un concept scientifique est complexe, plus l'effort cognitif que devra déployer l'élève pour le sélectionner et le mobiliser semble être important. Ainsi, il apparaît possible que la mobilisation du contrôle inhibiteur soit modulée à la fois par le niveau de *familiarité* des conceptions intuitives auxquelles l'élève doit résister et par le niveau de *complexité* des concepts scientifiques qu'il doit sélectionner et mobiliser pour raisonner correctement.

2.3 Hypothèses de recherche

Cette recherche s'inscrit dans la lignée des recherches menées récemment en didactique des sciences portant sur les processus cognitifs qui sous-tendent les apprentissages scientifiques, mais se penche plus spécifiquement sur le rôle de deux variables didactiques susceptibles d'influencer le contrôle inhibiteur dans le contexte du raisonnement scientifique. Cette recherche tentera de répondre à la question suivante : quelles sont les variables didactiques pouvant influencer la mobilisation du contrôle inhibiteur lors d'apprentissages scientifiques au primaire auxquels sont associées des conceptions intuitives fréquentes ?

Notre recension des écrits met en évidence que la *familiarité* des conceptions intuitives et la *complexité* des concepts scientifiques pourraient être des variables didactiques qui influencent la mobilisation du contrôle inhibiteur. La *familiarité* peut être définie comme l'ensemble des critères relatifs à la quotidienneté, à la prévalence socioculturelle, à la familiarité sémantique, à l'intuitivité et à l'utilité perçue des conceptions intuitives. La *complexité* peut être définie pour sa part comme l'ensemble des critères relatifs au niveau d'abstraction, à la charge cognitive, à la complexité sémantique et à la complexité contextuelle des concepts scientifiques à apprendre. Il importe de préciser que comme ce projet se penche sur ces variables pour une première fois, les différents critères définis dans ce cadre théorique seront considérés comme contribuant de façon équivalente à chacune des variables. Un projet ultérieur pourrait par ailleurs aider à préciser si certains critères ont plus d'importance que d'autres. Ainsi, à la lumière des résultats de recherche récents évoqués dans ce cadre théorique, nous posons les deux hypothèses suivantes :

H₁ : Plus le niveau de *familiarité* d'une conception intuitive est faible et plus le concept scientifique qui lui est associé à un faible niveau de *complexité*, moins la mobilisation du contrôle inhibiteur sera importante.

H₂ : À l'opposé, plus une conception intuitive a un niveau élevé de *familiarité* et plus le concept scientifique qui lui est associé a un niveau élevé de *complexité*, plus la mobilisation du contrôle inhibiteur sera importante.

La Tableau 2.1 présentée ci-dessous représente visuellement ces deux hypothèses, c'est-à-dire les deux conditions pour lesquelles une mobilisation plus ou moins importante du contrôle inhibiteur pourrait être nécessaire pour que l'élève réponde correctement.

Tableau 2.1 Hypothèses de recherche

Variables didactiques	V2 : <i>Complexité</i> du concept scientifique associé	
V1 : <i>Familiarité</i> de la conception intuitive	<i>Complexité</i> faible : C ↓	<i>Complexité</i> élevée : C ↑
<i>Familiarité</i> faible : F ↓	F ↓ C ↓ H₁ : Mobilisation moins importante du contrôle inhibiteur	F ↑ C ↓
<i>Familiarité</i> élevée : F ↑	F ↓ C ↑	F ↑ C ↑ H₂ : Mobilisation plus importante du contrôle inhibiteur

Par ailleurs, ce projet de recherche pourra aussi permettre de préciser la force relative de chacune de ces deux variables didactiques en faisant aussi l'analyse de conditions « intermédiaires » (en gris sur le Tableau 2.1), c'est-à-dire une *familiarité* élevée associée à une *complexité* faible, ainsi qu'une *familiarité* faible associée à une *complexité* élevée. La littérature scientifique actuelle ne permet pas d'établir d'hypothèses de recherche pour ces conditions. Ces deux conditions peuvent néanmoins être intéressantes à étudier puisqu'elles pourraient aider à préciser la force relative de chacune des deux variables, possiblement en lien avec les différents critères utilisés pour les définir opérationnellement.

Pour vérifier ces deux hypothèses de recherche, quatre tâches cognitives qui correspondent au croisement des niveaux faible et élevé des variables *familiarité* et *complexité* seront conçues et complétées par des élèves du 3^e cycle du primaire, afin d'analyser l'effet individuel et combiné des deux variables didactiques sur la mobilisation du contrôle inhibiteur. Comme exposé dans ce cadre théorique, la mobilisation du contrôle inhibiteur peut être mesurée de différentes façons, notamment en utilisant les temps de réponse.

Le chapitre 3 de ce mémoire présente plus en détail comment, de manière opérationnelle, les hypothèses de recherche sont vérifiées.

CHAPITRE 3

MÉTHODOLOGIE

Ce chapitre présente le devis méthodologique retenu pour répondre à la question et aux objectifs de cette recherche. Celui-ci est structuré en quatre grandes phases distinctes. La première phase concerne la sélection des contenus scientifiques qui correspondent le mieux au croisement des niveaux faible et élevé des variables *familiarité* et *complexité*. Un panel de didacticien en sciences a contribué à cette sélection qui constituait le point de départ des autres phases du projet. Le chapitre présente ensuite la deuxième phase, soit la conception de quatre tâches cognitives en amorçage négatif basées sur les contenus scientifiques identifiés par le panel de didacticiens. Par la suite, la troisième phase, qui concerne la passation des tâches auprès d'élèves du 3^e cycle du primaire, est décrite en expliquant les critères de sélection des participants, les modalités de recrutement et d'échantillonnage et le déroulement de la collecte de données dans les écoles. La quatrième et dernière phase de ce projet concerne l'analyse des données. Les modalités de traitement et d'analyse des données sont présentées. Ce chapitre se conclut en présentant les considérations éthiques relatives à cette recherche, notamment en ce qui a trait à l'obtention du consentement éclairé et au respect de la confidentialité et de l'anonymat.

3.1 Phase 1 : Sélection des contenus scientifiques

Cette phase était préalable aux autres phases de ce projet de recherche, qui concernent la conception et la passation de quatre tâches cognitives auprès d'élèves du primaire utilisées afin de mesurer et d'analyser l'effet des variables *familiarité* et *complexité* sur la mobilisation du contrôle inhibiteur. D'abord, un inventaire des conceptions intuitives qui reviennent fréquemment dans la littérature et des concepts scientifiques qui leur sont associés a été dressé (Allaire-Duquette *et al.*, 2019; Thouin, 2017). Bien qu'une variété de conceptions puisse être impliquée simultanément dans le raisonnement scientifique, celles-ci sont majoritairement présentées en « paires » dans les écrits scientifiques, c'est-à-dire **une** conception intuitive qui interfère avec **un** concept scientifique (voir par ex. Thouin, 2017). Ainsi, l'appellation « paire de conceptions » fera référence à une conception intuitive et à un concept scientifique, soit celui qui lui est associé.

Ensuite, parmi cet inventaire, des paires de conceptions ont été sélectionnées en fonction de trois critères. D'abord, elles devaient toucher des concepts connus des élèves du 3^e cycle du primaire (Gouvernement du Québec, 2006a) puisqu'il s'agit des participants de cette recherche. Ensuite, il devait être possible de

les représenter visuellement dans le cadre d'une tâche informatisée, car le devis retenu implique de créer des tâches qui contiendront des images. Enfin, elles devaient être susceptibles de correspondre à l'une des quatre conditions expérimentales présentées par le Tableau 3.1 ci-dessous, qui ont été comparées pour répondre à la question de recherche. Ces quatre conditions correspondent au croisement des niveaux faible et élevé des variables *familiarité* et *complexité*.

Tableau 3.1 Représentation des quatre conditions expérimentales

Variables didactiques	V2 : <i>Complexité</i> du concept scientifique associé	
V1 : <i>Familiarité</i> de la conception intuitive	<i>Complexité</i> faible : C ↓	<i>Complexité</i> élevée : C ↑
<i>Familiarité</i> faible : F ↓	F ↓ C ↓ Condition 1	F ↓ C ↑ Condition 3
<i>Familiarité</i> élevée : F ↑	F ↑ C ↓ Condition 2	F ↑ C ↑ Condition 4

Au terme de ce processus d'inventaire, huit paires ont été retenues, telles que présentées dans le Tableau 3.2. Ces paires de conceptions touchent des contenus d'apprentissage variés et sont susceptibles d'aider à mieux comprendre ce qui caractérise la mobilisation du contrôle inhibiteur. Ensuite, afin de faire une sélection objective des quatre paires correspondant le mieux aux quatre conditions expérimentales, il a été choisi de faire appel à l'expertise d'un panel de didacticiens en sciences, par le biais d'un processus de prise de décision de groupe inspiré de la méthode Delphi (Okoli et Pawlowski, 2004).

Tableau 3.2 Paires de conceptions évaluées par le panel de didacticiens

Paires	Thèmes	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'eau qui bout	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 Terre-Lune-Soleil	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	Le vivant	Ce qui bouge est vivant.	Les êtres vivants sont des organismes composés d'une ou plusieurs cellules.

3.1.1 Critères de sélection et formation du panel de didacticiens en sciences

Afin d'identifier les contenus qui correspondent le mieux au croisement des niveaux faible et élevé des deux variables didactiques de cette étude, soit la *familiarité* des conceptions intuitives et la *complexité* des concepts scientifiques, il a été décidé de faire appel à un panel de didacticiens des sciences puisque ceux-ci détiennent un niveau d'expertise élevé en didactique des sciences et paraissent, de ce fait, les mieux placés pour juger de la *familiarité* des conceptions intuitives et de la *complexité* des concepts scientifiques. Les deux critères établis pour sélectionner les didacticiens participants au panel étaient : 1- détenir un doctorat en didactique des sciences (Ph.D.) et 2- comprendre le français écrit puisque cette recherche se déroule en français.

Comme les personnes francophones détentrices d'un doctorat en didactique des sciences sont peu nombreuses, leur recrutement s'est fait principalement par sollicitation directe, ainsi que par la technique « boule-de-neige » (Gaudreau, 2011). D'abord, une liste de didacticiens des sciences a été dressée, puis un courriel de sollicitation leur a été envoyé durant la semaine du 2 mars 2022. Le matériel de recrutement peut être consulté à l'*Annexe A*. Une description détaillée du projet de recherche et de la participation attendue accompagnait le courriel de recrutement sous forme de pièce jointe. Au fur et à mesure que les didacticiens acceptaient de participer, ceux-ci recevaient immédiatement un formulaire d'informations et de consentement, approuvé par le CIEREH, et devaient le signer et le retourner (voir *Annexe B*). Quelques didacticiens des sciences ont recommandé leurs collègues de travail; ceux-ci ont donc été contactés subséquemment. Il n'a pas été nécessaire de recruter des didacticiens sur les réseaux sociaux ou à l'étranger. Les didacticiens ont été informés que leur participation était libre, volontaire et qu'en tout temps, ils pouvaient y mettre un terme. Le consentement écrit a été obtenu pour tous les didacticiens. Ainsi, le panel se compose de 20 didacticiens des sciences, tous détenteurs d'un doctorat en didactique des sciences, professeurs dans des universités canadiennes et qui comprennent le français écrit.

3.1.2 Déroulement du processus d'évaluation des paires de conceptions

Afin d'obtenir des données permettant de quantifier la *familiarité* et la *complexité* et de s'assurer que le jugement de tous les didacticiens ait la même importance, il a été choisi d'utiliser un questionnaire. Ainsi, dès la réception du formulaire de consentement signé, les didacticiens recevaient, par courriel, un numéro de participant ainsi qu'un lien menant au questionnaire. Un délai de trois semaines leur était alloué pour le compléter. Les consignes pour remplir le questionnaire étaient intégrées à celui-ci.

Un fichier collaboratif construit sur Excel permettait de suivre l'évolution des différentes étapes du processus auprès des didacticiens. Il importe de mentionner que leur participation était libre, volontaire, et n'impliquait pas davantage particulier, outre le fait de contribuer à une recherche scientifique. Remplir le questionnaire prenait environ 45 minutes. L'ensemble des questionnaires a été rempli entre le 3 mars et le 5 avril 2022. Un courriel de remerciement a été envoyé à tous les didacticiens au terme de leur participation.

3.1.3 Description du questionnaire

Le questionnaire utilisé a été construit sur l'application GoogleForm. L'utilisation de cette application comporte certains inconvénients, notamment le fait que les données ne soient pas entreposées sur les

serveurs institutionnels de l'UQAM. Par contre, puisque les données collectées ne contenaient aucune information de nature confidentielle ni aucune information permettant d'identifier les participants, et que la majorité des gens sont plus familiers avec l'utilisation de GoogleForm, il a été choisi d'élaborer le questionnaire destiné aux didacticiens sur cette application. Les données recueillies au moyen de questionnaires élaborés sur GoogleForm ont aussi comme avantage de pouvoir être téléchargées directement sur Excel.

En guise d'introduction, le questionnaire expliquait d'abord aux didacticiens qu'ils étaient invités évaluer huit paires de conceptions. Il était mentionné que ces conceptions viennent en paires et que chaque paire porte sur un thème précis. Plus spécifiquement, ces paires sont composées d'une conception intuitive, dite « non-scientifique », c'est-à-dire une conception fréquemment entretenue par les élèves et qui n'est pas en accord avec les connaissances scientifiques actuelles, ainsi que d'une conception « scientifique », soit l'explication généralement acceptée par la communauté scientifique pour le même phénomène. Dans le questionnaire, il était expliqué que pour chacune de ces paires, les didacticiens devaient porter un jugement concernant la *familiarité* de la conception intuitive, ainsi que la *complexité* de son pendant scientifique (pour voir un extrait du questionnaire, se référer à l'Annexe C). Par la suite, afin que les didacticiens aient une compréhension commune des variables de cette étude, la *familiarité* leur était définie ainsi : « Certaines conceptions entretenues par les élèves sont issues de leur quotidien, de leur expérience personnelle, ou encore de leur entourage. Ils y adhèrent généralement parce qu'elles proposent des explications simples pour des phénomènes récurrents, ou encore simplement parce qu'ils n'ont aucune raison de les remettre en question. Cinq critères ont été retenus pour évaluer le niveau de *familiarité* de ces conceptions. » Quant à la *complexité*, elle était définie comme suit : « À l'inverse, plusieurs conceptions scientifiques sont difficiles à maîtriser parce que certaines de leurs caractéristiques les rendent particulièrement complexes. Une explication trop abstraite, par exemple, pourrait être délaissée par les élèves puisqu'ils seraient incapables de s'en faire une représentation intelligible ou de la relier à d'autres phénomènes plus familiers. Quatre critères ont été retenus pour évaluer le niveau de *complexité* de ces conceptions. »

Ensuite, le questionnaire indiquait aux didacticiens que ceux-ci devaient attribuer des scores en utilisant des échelles de Likert allant de 1 à 6 pour chacun des 5 critères permettant d'opérationnaliser la *familiarité*, tels que définis dans le cadre théorique de ce mémoire, ainsi que pour chacun des 4 critères permettant, quant à eux, d'opérationnaliser la *complexité*. Les huit paires de conceptions étaient également décrites

aux didacticiens. Les paires de conceptions portaient sur : 1- la flottabilité; 2- les corps en chute libre; 3- l'eau qui bout; 4- le magnétisme; 5- les états de la matière; 6- les champignons; 7- le système Soleil-Terre-Lune et 8- les êtres vivants. Ces définitions avaient pour objectif d'uniformiser la compréhension qu'ont les didacticiens des différents éléments contenus dans le questionnaire. Tous les didacticiens ont ensuite évalué chaque conception au regard de chaque critère.

3.1.4 Analyse des réponses des didacticiens

Au terme de ce processus d'évaluation des paires de conceptions, les données ont d'abord été téléchargées sur Microsoft Excel Windows 10 afin d'être organisées pour les analyses. Par la suite, les données ont été transférées sur la plateforme SPSS (IBM® SPSS® software), version 28, dans le but de générer un score de *familiarité* pour chaque conception intuitive, ainsi qu'un score de *complexité* pour chaque concept scientifique. Pour chaque conception intuitive, l'évaluation chiffrée (1 à 6) octroyée par les didacticiens à chacun des indicateurs contribuant à la *familiarité* a été utilisée pour calculer la moyenne. Ensuite, la moyenne de ces moyennes a été effectuée pour chaque conception. Sur le plan théorique, il est possible qu'un des indicateurs sollicite davantage le contrôle inhibiteur que d'autres, mais comme cette recherche explore ces indicateurs et ces variables pour une première fois, il a été choisi de les considérer également. Cette procédure a permis d'obtenir un score moyen de *familiarité* pour chaque conception intuitive qui tient compte des cinq indicateurs de manière équivalente. De la même manière, un score moyen de *complexité* qui tient compte des quatre indicateurs a été obtenu pour chaque concept scientifique. Le choix d'utiliser la moyenne permet de considérer l'ensemble des données de manières équivalentes (Field, 2009; Haccoun et Cousineau, 2010). Ainsi, tous les indicateurs ont la même importance dans les scores de *familiarité* et de *complexité* obtenus, et l'évaluation de chaque didacticien aussi. Les scores de *familiarité* et de *complexité* ont par la suite permis de générer un graphique visant à illustrer la répartition des huit paires de conceptions au regard de leur *familiarité* et de leur *complexité*. Le score moyen de *familiarité* et de *complexité* a également été calculé au regard des huit paires de conceptions. Cette procédure a permis d'identifier les paires de conceptions les plus contrastées au regard de la *familiarité* et de la *complexité* qui correspondent le mieux aux quatre conditions expérimentales de cette recherche.

3.1.5 Sélection finale des contenus

Les didacticiens ont procédé à l'évaluation des 9 indicateurs pour les 8 conceptions intuitives et les 8 concepts scientifiques qui leur sont associés, ce qui avait le potentiel de générer 1 800 données. Puisque

les didacticiens avaient la possibilité de répondre « Ne s'applique pas/Je ne sais pas », 1 765 données ont contribué à l'obtention des scores. De ce nombre, 4 données ont été retirées. Ces données correspondent à l'évaluation du didacticien DID04 qui accordait une évaluation de 6 à tous les indicateurs pour la conception 5 (score de complexité moyen pour la conception = 6). Ce score se trouvait à être anormalement élevé au regard des scores octroyés par les autres didacticiens (> 3,5 écarts-types de la moyenne), ce qui peut supposer une compréhension atypique de la conception à l'étude. Également, aucun autre didacticien n'a accordé le même score à tous les indicateurs pour une conception, ce qui était également particulier dans le cas du didacticien DID04. Les 1 761 données utilisées dans les analyses ont permis d'obtenir un score de *familiarité* et un score de *complexité* pour chacune des paires de conceptions, tel que présenté dans le Tableau 3.3.

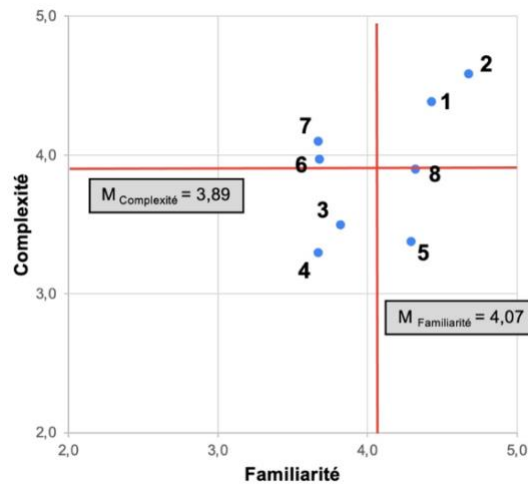
Tableau 3.3 Scores de familiarité et de complexité

Paires de conceptions	Scores de <i>familiarité</i>	Score de <i>complexité</i>
1 Flottabilité	4,44 (0,58)	4,39 (0,78)
2 Corps en chute libre	4,67 (0,49)	4,59 (0,56)
3 Ébullition	3,81 (0,71)	3,50 (0,73)
4 Magnétisme	3,66 (0,52)	3,30 (0,90)
5 États de la matière	4,31 (0,70)	3,38 (0,68)
6 Champignons	3,68 (0,65)	3,98 (0,95)
7 Système Terre-Lune-Soleil	3,67 (0,86)	4,10 (1,01)
8 Vivant	4,32 (0,89)	3,90 (0,78)

Note. Les écarts-types apparaissent entre parenthèses.

Considérant que les échelles de Likert utilisées allaient de 1 à 6, un premier constat est que les scores obtenus sont relativement élevés, ce qui suggère que les variables *familiarité* et *complexité* caractérisent en partie toutes les paires de conceptions retenues. Le score moyen de *familiarité* est $M_{\text{Familiarité}} = 4,07$ (ET = 0,68) tandis que le score moyen de *complexité* est $M_{\text{Complexité}} = 3,89$ (ET = 0,80). Afin de représenter visuellement la répartition des paires de conceptions en fonction de leur score de *familiarité* et de *complexité*, un graphique a été généré, tel que présenté sur la Figure 3.2. Les deux lignes rouges sont situées sur les moyennes de *familiarité* et de *complexité* afin de voir si des paires de conceptions semblaient correspondre aux quatre conditions expérimentales.

Figure 3.1 Répartition des 8 paires de conceptions au regard de leur familiarité et de leur complexité



Ce graphique met en évidence donc que les paires de conceptions 2, 4, 5 et 7 sont celles qui, selon le panel de didacticiens, correspondent le mieux au croisement de niveaux faible et élevé des variables *familiarité* et *complexité*. Ces paires de conceptions concernent des contenus relatifs aux corps en chute libre, au magnétisme, aux états de la matière et au système Soleil-Terre-Lune. Ces contenus scientifiques ont donc été retenus afin de passer à la phase méthodologique suivante, soit la création de tâches cognitives visant à révéler la mobilisation du contrôle inhibiteur. Par ailleurs, dès les premières tentatives visant à concevoir les tâches, il s'est avéré que la tâche relative aux corps en chute libre n'était pas accessible aux élèves du primaire, car elle impliquait d'adopter des perspectives différentes pour juger de la chute des corps sans la résistance de l'air. Puisqu'il est primordial que les élèves soient en mesure de répondre correctement aux différents items de la tâche pour pouvoir ensuite mesurer la mobilisation du contrôle inhibiteur, il a été choisi a posteriori d'utiliser la paire de conceptions relative à la flottabilité (paire 1 sur la Figure 3.2 ci-haut). Puisque cette paire présente des scores élevés pour la *familiarité* et la *complexité*, elle correspond à la même condition expérimentale que la paire 2. Il a donc été choisi de concevoir des tâches portant sur les paires 2, 4, 5 et 7. Le Tableau 3.4 montre à quelle condition expérimentale correspond chacune des paires retenues.

Tableau 3.4 Paires de conceptions correspondant aux quatre conditions expérimentales

Conditions expérimentales	Paires	Conceptions intuitives	Concepts scientifiques
Condition 1 F ↓ C ↓	Paire 4 Magnétisme	Tous les métaux sont attirés par les aimants.	Seuls certains métaux sont attirés par les aimants.
Condition 2 F ↑ C ↓	Paire 5 État solide	Les solides sont rigides.	Certains solides ne sont pas rigides.
Condition 3 F ↓ C ↑	Paire 7 Système Terre-Lune-Soleil	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.
Condition 4 F ↑ C ↑	Paire 1 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.

Pour conclure cette section, il importe de mentionner que les données issues de ce processus auprès des didacticiens pourraient être analysées et discutées au regard de nombreuses autres considérations didactiques pertinentes, mais qui ne seront pas présentées ici puisqu'elles ne sont pas en lien avec la question et les hypothèses de recherche. Ces données pourront faire l'objet d'une analyse ultérieure.

3.2 Phase 2 : Conception des tâches cognitives

La deuxième phase méthodologique de cette recherche consistait à concevoir quatre tâches cognitives visant à mesurer la mobilisation du contrôle inhibiteur. Le choix de la méthode de recherche et la description des instruments de collecte sont présentés dans cette section.

3.2.1 Choix de la méthode de recherche

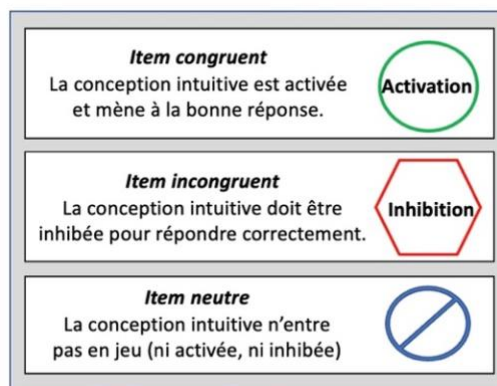
Plusieurs méthodes de recherche peuvent permettre de mesurer l'effet des variables *familiarité* et *complexité* sur la mobilisation de contrôle inhibiteur. Chacune comporte ses avantages et ses inconvénients (Masson et Borst, 2017). Dans les recherches en neuroéducation, des données comportementales (temps de réponse et taux de réponses correctes) sont généralement collectées pendant la passation de tâches cognitives durant lesquelles le participant est cognitivement engagé dans l'atteinte d'un objectif. Très souvent, afin de mesurer le contrôle inhibiteur, les tâches sont conçues de manière à ce que le participant doive, à l'occasion, inhiber ses conceptions intuitives pour répondre

correctement à certains types d'items. Dans le contexte de certaines recherches, il peut être intéressant de collecter également des données cérébrales. Par exemple, l'IRMf permet de prendre des images des activations cérébrales dans le cortex préfrontal ventrolatéral, une région associée au contrôle inhibiteur (Aron *et al.*, 2004; pour des exemples en sciences, voir Masson *et al.*, 2014; Brault Foisy *et al.*, 2015). L'électroencéphalographie (EEG) permet de mesurer l'activité électrique à l'aide d'électrodes placées sur le cuir chevelu du participant. La littérature scientifique suggère que des pics d'activation observés aux composantes N-200 (polarité négative observée à environ 200 ms) et P-300 (polarité positive observée vers 300 ms) soient associés au contrôle inhibiteur (Huster *et al.*, 2010; pour des exemples en sciences, voir Skelling-Desmeules *et al.*, 2021; Zhu *et al.*, 2019). Ainsi, l'utilisation de l'IRMf et l'EEG permettent d'étudier plus directement l'activité cérébrale, ce qui représente un avantage. Toutefois, le principal désavantage des méthodes permettant de collecter des données cérébrales concerne le coût d'acquisition des données qui est très élevé, ainsi que la quantité de temps très importante qui doit être investie dans la collecte étant donné que les données peuvent être collectées auprès d'un seul participant à la fois. Ainsi, dans le cadre de ce mémoire, qui explore pour la première fois les effets de la *familiarité* et de la *complexité* sur la mobilisation du contrôle inhibiteur, le recours à ces méthodes de recherche a été écarté. Il a été choisi d'utiliser exclusivement des données comportementales qui ont été collectées durant la passation de quatre tâches cognitives informatisées.

En psychologie cognitive et en neuropsychologie, les temps de réponse sont utilisés en recherche depuis plusieurs décennies (pour une revue, voir Kosinski, 2008); leur utilisation est également décrite depuis longtemps comme l'une des méthodes les plus puissantes permettant de mettre en relation des processus mentaux et des mesures comportementales (Welford, 1980). Par ailleurs, il importe qu'une attention particulière soit portée lors de la conception des tâches cognitives afin que les données comportementales recueillies permettent d'inférer la mobilisation du contrôle inhibiteur de manière rigoureuse. Trois méthodes, qui seront détaillées ci-après, sont souvent utilisées pour concevoir des tâches cognitives qui visent à détecter la mobilisation du contrôle inhibiteur. Ces trois méthodes ont été utilisées et validées dans le cadre de recherches en éducation portant sur différents contextes d'apprentissages dans lesquels des conceptions intuitives interfèrent avec les concepts scientifiques (Babai et Amsterdamer, 2008; Babai *et al.*, 2006; Babai *et al.*, 2010; Brault Foisy *et al.*, 2021; Brault Foisy *et al.*, en révision; Brookman-Byrne *et al.*, 2018; Potvin *et al.*, 2015; Vosniadou *et al.*, 2018). Ainsi, une littérature importante vient appuyer le choix d'utiliser les données comportementales pour étudier le contrôle inhibiteur.

Une première méthode consiste s'intéresser à l'*effet d'interférence* (Dempster, 1995). Pour ce faire, le chercheur compare les temps de réponse des participants pour différents types d'items. Trois types d'items sont souvent utilisés en guise de stimuli dans la conception des tâches : congruent, incongruent et neutre (voir Figure 3.5). Les items dits *congruents* sont congruents avec la conception intuitive, c'est-à-dire que la conception intuitive mène à la bonne réponse. Face à un item congruent, il est attendu que la conception intuitive de l'élève soit activée. L'item congruent illustre souvent le phénomène qui explique l'existence de la conception intuitive. Les items *incongruents*, quant à eux, sont incongruents avec la conception intuitive. Pour bien répondre, le participant doit d'abord inhiber la conception intuitive pour ensuite mobiliser le concept scientifique. L'item incongruent illustre la situation dite « piège » où la conception intuitive ne fonctionne pas. Enfin, certaines tâches impliquent des items *neutres*, pour lesquels la conception intuitive ne mène ni à la bonne ni à la mauvaise réponse. Elle n'est ni activée ni inhibée. L'item neutre illustre une situation similaire aux précédentes, mais dans laquelle la caractéristique vraie ou fautive de la conception intuitive n'entre pas en jeu. Ainsi, le raisonnement impliqué dans le traitement cognitif de ces trois types d'items diffère. Pour répondre correctement à un item incongruent, le participant doit mobiliser son contrôle inhibiteur, ce qui se traduit souvent par un léger délai dans les temps de réponse et un taux de réponses correctes un peu moins élevé que pour les deux autres types d'items.

Figure 3.2 Trois types d'items fréquemment utilisés dans la conception de tâches cognitives

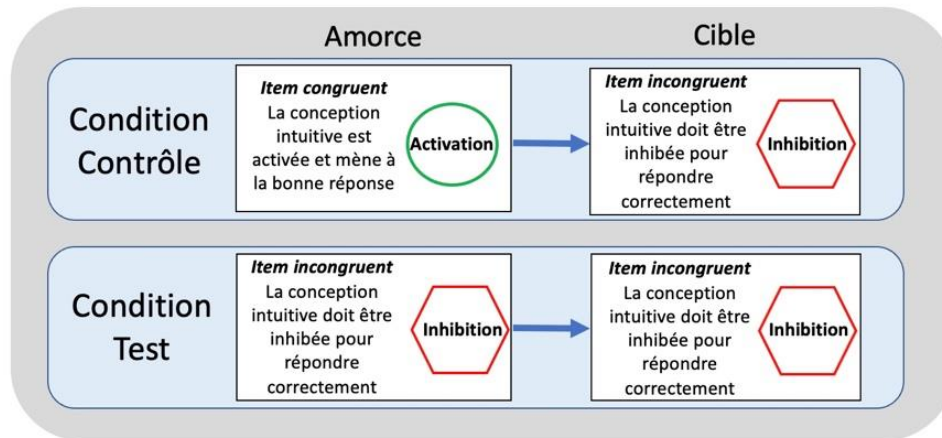


D'ailleurs, les écrits scientifiques suggèrent que plus le temps de réaction est long pour certains items, plus le raisonnement impliqué est complexe (Denes et Pizzamiglio 1999; Kandel *et al.*, 2000; Spieler *et al.*, 2000). En sciences, par exemple, des recherches ont montré que les temps de réponse sont significativement plus longs pour répondre à des items incongruents qu'à des items congruents (voir par ex. Babai et Amsterdamer, 2008; Babai *et al.*, 2006; Babai *et al.*, 2010). Par contre, certains chercheurs soutiennent

qu'étant donné que les items des deux conditions sont rarement parfaitement équivalents, il peut être difficile de conclure avec certitude que les différences observées dépendent seulement de la mobilisation du contrôle inhibiteur, et non d'autres considérations liées au traitement de l'information ou à la conception de la tâche (Salo *et al.*, 2001).

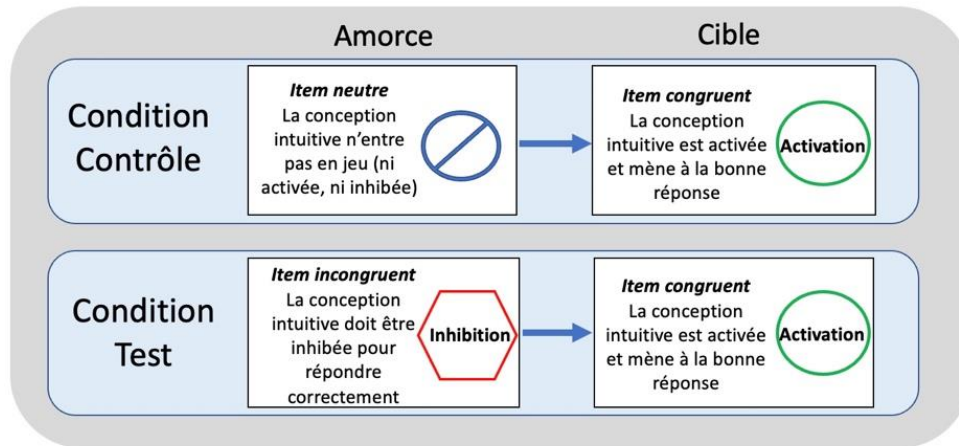
Une autre méthode consiste à recourir à l'*effet d'amorçage*. Cet effet est très documenté dans les recherches en psychologie cognitive (pour une revue, voir Janiszewski et Wyer, 2014). La logique sous-jacente aux paradigmes expérimentaux qui utilisent l'effet d'amorçage est la suivante : activer ou inhiber une idée par le biais d'un item influencera la manière dont l'item subséquent sera traité (Tulving et Schacter, 1990). L'un de ces paradigmes est le paradigme d'*amorçage positif*. Celui-ci a initialement été utilisé dans des tâches classiques visant à détecter la mobilisation du contrôle inhibiteur, telles la tâche de Stroop et la tâche de Flanker (Botvinick *et al.*, 1999; Hommel *et al.*, 2004; Larson *et al.*, 2009). Dans ce paradigme, des essais test et contrôle se succèdent. Dans les deux types d'essais, le type d'item présenté en amorce diffère, tandis que les items présentés en cible sont semblables (voir Figure 3.6). Ainsi, lors de l'essai contrôle, le participant doit activer une conception intuitive, tandis que lors de l'essai test, il doit l'inhiber pour parvenir à répondre correctement. Dans les deux essais, l'item qui suit en cible demande au participant d'inhiber. Dans la condition test, le traitement de la cible est un peu plus rapide que dans la condition contrôle, car il implique d'inhiber une conception intuitive qui venait tout juste d'être inhibée. Ainsi, dans la condition test, le traitement de l'item cible est facilité par celui de l'amorce, d'où l'*effet d'amorçage positif* (pour une revue, voir Roediger et McDermott, 1993; Tulving et Schacter, 1990). Certains auteurs suggèrent que la mobilisation du contrôle inhibiteur et, plus largement, du contrôle cognitif, sont facilités après avoir résolu un conflit (Botvinick *et al.*, 2001; Egner, 2007; Ullsperger *et al.*, 2005).

Figure 3.3 Représentation du paradigme expérimental d'amorçage positif



Une autre méthode qui utilise l'effet d'amorçage est le paradigme expérimental d'amorçage négatif (Tipper, 1985, 2001). Contrairement à l'amorçage positif où l'amorce a pour effet d'accélérer le traitement de l'item en cible, l'amorce a cette fois pour effet de *ralentir* le traitement de l'item en cible, d'où l'effet d'amorçage *négatif*. La logique derrière le paradigme d'amorçage négatif est la suivante : si le participant doit inhiber une conception intuitive pour répondre correctement à un item, puis doit réactiver cette même conception pour répondre à l'item suivant, cette réactivation sera plus difficile sur le plan cognitif et entraînera une légère baisse de la performance et une augmentation du temps de réponse (Borst *et al.*, 2013a; Neill *et al.*, 1995; Tipper, 2001). Les tâches conçues selon un paradigme d'amorçage négatif impliquent des conditions test et contrôle, comme le montre la Figure 3.7. Chaque condition est composée de deux items, un item en amorce et un en cible. Dans la condition contrôle, la conception intuitive n'entre pas du tout en jeu pendant l'amorce (elle n'est ni activée ni inhibée; item neutre), mais doit être mobilisée pour fournir la bonne réponse pour l'item en cible (item congruent). Dans la condition test, en revanche, le participant doit d'abord inhiber une conception intuitive afin de répondre correctement à l'élément présenté en amorce (item incongruent), puis réactiver cette même conception pour répondre à l'item en cible (item congruent). Réactiver une conception qui vient tout juste d'être inhibée se traduit par un temps de réponse légèrement plus élevé à l'item en cible pour la condition test (Borst *et al.*, 2013a). L'effet d'amorçage négatif, soit l'écart entre les temps de réponse aux items congruents présentés en cible, est considéré comme une mesure du contrôle inhibiteur puisque le ralentissement du traitement de l'item cible dans la condition test est, par hypothèse, causé par la mobilisation du contrôle inhibiteur en amorce. Effectivement, comme les items en cible sont les mêmes dans les deux conditions (items congruents), seule l'amorce (item neutre ou incongruent) peut expliquer un traitement différent de la cible.

Figure 3.4 Représentation du paradigme expérimental d'amorçage négatif



Cet effet d'amorçage négatif a été observé pour la première fois dans une tâche de Stroop (Dalrymple-Alford et Budayr, 1966). Ces chercheurs ont observé des temps de réponse plus longs lorsque les participants devaient nommer une couleur dont le nom avait dû être inhibé pour bien répondre à l'item précédent. Cet effet a par la suite été observé dans d'autres types de tâches, notamment des tâches d'identification d'images, de mots et de lettres (Kane *et al.*, 1994; Tipper, 1985; Tipper et Cranston, 1985) et des tâches de dénombrement (Driver et Tipper, 1989). Cet effet d'amorçage négatif est associé à l'inhibition d'un item qui interfère en amorce (pour une revue, voir Tipper, 2001; voir aussi Borst *et al.*, 2013a; Tipper, 1985; Tipper et Cranston, 1985). Bien qu'il ait été conçu initialement pour détecter la mobilisation du contrôle inhibiteur dans des tâches liées à l'attention sélective (Tipper, 1985), ce paradigme a récemment été adapté pour inférer la mobilisation du contrôle inhibiteur dans des tâches de raisonnement logicomathématique (Houdé et Guichard, 2001; voir aussi Borst *et al.*, 2013b; Moutier *et al.*, 2005). Dans ces tâches de raisonnement, plutôt que d'inhiber une information visuelle, c'est une stratégie intuitive que les participants doivent inhiber pour répondre correctement. Dans la dernière décennie, ce paradigme a été utilisé dans des contextes de plus en plus variés, et surtout, de plus en plus près des apprentissages scolaires, notamment dans des tâches liées à la lecture (Ahr *et al.*, 2016; Brault Foisy *et al.*, 2017; Borst *et al.*, 2015), à la conjugaison (Lanoë *et al.*, 2016), à la résolution de problèmes écrits (Lubin *et al.*, 2013), à la comparaison de nombres décimaux (Roëll *et al.*, 2019), à la flottabilité (Brault Foisy *et al.*, 2021) et à la distinction entre le vivant et le non-vivant (Brault Foisy *et al.*, en révision). De plus, ce paradigme s'avère efficace auprès de différents groupes d'âge, incluant les élèves du primaire (voir par ex. Ahr *et al.*, 2016; Viarouge *et al.*, 2019).

Un dernier élément pertinent à mentionner concerne l'activité cérébrale associée à l'effet d'amorçage négatif. Quelques recherches en neuroimagerie ont tenté de déterminer quelles régions cérébrales s'activent lorsque des participants accomplissent une tâche conçue selon le paradigme d'amorçage négatif (Egner et Hirsh 2005; Steel *et al.*, 2001). Par exemple, en utilisant une tâche de Stroop conçue selon le paradigme d'amorçage négatif, Steel et ses collègues (2001) ont montré que l'activation de régions frontales était plus importante pour les items incongruents, une région cérébrale associée au contrôle inhibiteur (Aron *et al.*, 2004). De manière convergente, une étude menée auprès d'enfants de 11 à 13 ans a montré que plusieurs régions du cortex préfrontal étaient activées pour les items incongruents, alors que ce n'était pas le cas pour les items neutres (Wright *et al.*, 2005). Ces résultats soutiennent donc l'idée que les temps de réponse plus longs observés aux items incongruents sont possiblement dus au besoin de mobiliser ces régions préfrontales, qui sont associées au contrôle inhibiteur (pour une méta-analyse, voir Yapple et Arsalidou, 2017).

Lorsque les conditions le permettent, le paradigme d'amorçage négatif semble être souvent priorisé pour concevoir des tâches cognitives visant à mesurer le contrôle inhibiteur. En comparant des conditions test et contrôle pour lesquelles seule l'amorce diffère, il est reconnu comme étant un devis méthodologique rigoureux pour mesurer le contrôle inhibiteur (Borst *et al.*, 2013a; Wright *et al.*, 2005). De plus, l'effet d'amorçage négatif a été rapporté dans des tâches impliquant des items variés (mots, lettres, images, chiffres) (pour une revue, voir Borst *et al.*, 2013a) et dans une variété de contextes scolaires, dont les sciences (Brault Foisy *et al.*, 2021). C'est donc ce paradigme qui sera retenu pour concevoir les tâches cognitives et mesurer le contrôle inhibiteur dans le cadre de cette recherche.

3.2.2 Description des instruments de collecte

Les instruments de collecte qui ont été utilisés consistent donc en quatre tâches cognitives conçues selon le paradigme d'amorçage négatif. Plusieurs plateformes destinées à la conception de tâches existent, notamment Gorilla, E-prime, jsPsych, Lab.js, psychoJS et PsychoPy3. C'est la plateforme Gorilla, lancée en 2016, qui a été retenue pour concevoir les tâches cognitives de cette recherche. Un élément important qui distingue Gorilla des autres outils destinés à concevoir ces tâches est son interface graphique facile à utiliser. Ainsi, la conception des tâches ne nécessitait pas de connaissances particulières en langage JavaScript. De plus, son utilisation ne requérait pas l'installation d'un logiciel particulier, ni pour l'équipe de recherche ni pour les participants. Gorilla permet de collecter des données comportementales, incluant les temps de réponse des élèves et le fait de manière fiable et précise (Anwyl-Irvine *et al.*, 2020a). Enfin,

un dernier avantage est que son utilisation est gratuite pour concevoir les tâches. Il faut seulement payer pour les données collectées (système de paiement par participant), contrairement à d'autres plateformes.

En ce qui a trait à la collecte de données dans les écoles, il a été choisi d'utiliser des tablettes électroniques (iPad), car les élèves du primaire sont généralement plus familiers avec l'interface d'une tablette que celle d'un ordinateur. L'utilisation d'un écran tactile est également avantageuse, car elle permet à l'élève d'appuyer directement sur la réponse et lui évite de partager son attention entre l'écran et un clavier, comme c'est le cas sur un ordinateur. Tous les participants ont utilisé une tablette identique, ainsi que le même navigateur, afin d'éviter que les différences dans les temps de réponse ne soient associées à l'équipement ou à l'environnement informatique. Effectivement, des modèles complexes de variations dans les temps de réaction sont associés à différents éléments, incluant la taille de l'écran, le type de navigateur, l'année de fabrication de l'appareil, etc. (Anwyl-Irvine *et al.*, 2020b). Les tablettes qui ont été utilisées sont des iPad 10,2 po 64 Go d'Apple (9^e génération), protégées par des étuis Otterbox Defender iPad. Le système d'exploitation le plus récent au moment de la collecte, soit la version iOS 16.1, était installé sur tous les iPads, de même que le navigateur Chrome. Sur l'écran d'ouverture de la tablette, un lien menant directement vers chacune des tâches cognitives était affiché afin de faciliter la gestion de la collecte de données. L'ensemble des iPads étaient connectés à une borne sans fil (« *Hot spot* ») de type Mifi 5 Go M2000 afin de ne pas dépendre du réseau Wifi des écoles primaires participantes.

3.2.2.1 Conception générale

Chacune des tâches portait sur une paire de conceptions différentes et, de ce fait, sous-tendait une condition expérimentale précise. Afin de pouvoir mesurer et comparer la mobilisation du contrôle inhibiteur en fonction de quatre conditions expérimentales différentes, les quatre tâches cognitives ont été conçues de manière à ce qu'elles soient les plus équivalentes possibles entre elles. Puisque certaines variables externes, telles que les doigts utilisés pour répondre, l'apparence visuelle des items et le mode de réponse, sont susceptibles d'influencer les temps de réponse des participants (Kosinski, 2008), une attention particulière a été portée afin de contrôler ces variables, et ce, tant lors de la conception des tâches que lors de la passation de celles-ci. Tout au long du processus de conception des tâches, l'intention de l'équipe de recherche était que le seul élément qui distingue réellement les quatre tâches concerne son contenu scientifique, qui est lié aux différents niveaux des variables *familiarité* et *complexité*.

Toutes les consignes des tâches étaient intégrées à celles-ci. D'abord, pour chaque tâche, le concept scientifique impliqué dans la tâche était présenté très brièvement aux élèves afin de s'assurer qu'ils comprenaient bien ce sur quoi porte la tâche. Par exemple : « Le magnétisme, c'est une caractéristique qui fait en sorte que les objets sont attirés ou repoussés par un aimant. » Ensuite, la question à laquelle les élèves devaient répondre durant la tâche, ainsi que le mode de réponse, était présentée. La nature des conceptions intuitives et des concepts scientifiques a fait en sorte que pour réussir à formuler les quatre questions de la même manière, il a fallu les formuler en commençant par les mots « Est-ce que... ? » et utiliser un mode de réponse de type OUI-NON. Selon certains chercheurs, ce mode de réponse peut comporter quelques inconvénients, notamment le fait qu'il est généralement plus rapide de répondre OUI que NON. À titre d'exemples, les études de Shtulman et Valcarcel (2012) et de Brookman-Byrne et ses collègues (2018), qui concernent des conceptions intuitives variées, mettent toutes deux en évidence qu'identifier un fait scientifique comme étant vrai est plus rapide que d'affirmer qu'il est faux. En revanche, dans le cas de la présente étude, il était plus important que les questions des quatre tâches puissent être formulées de la même manière et que, parallèlement, le mode de réponse soit identique, ce pour quoi les questions de type « Est-ce que...? » et le mode de réponse OUI-NON ont été retenus. Ainsi, à chaque tâche, les élèves devaient répondre à une question unique en appuyant sur le bouton OUI ou sur le bouton NON pour répondre. Le visuel des boutons de réponse était identique dans chacune des quatre tâches.

Chaque tâche contenait 10 items présentés sous forme d'images : des items neutres, des items incongruents et des items congruents. Une attention particulière a été portée afin que la taille des différents items soit similaire et que leur apparence soit réaliste. Il a été choisi de présenter les items en couleurs puisque celles-ci sont susceptibles de contribuer aux conceptions intuitives. Par exemple, dans la tâche portant sur le magnétisme, la couleur gris-argenté de l'item « assiette en aluminium » est semblable à celle de l'item « clou en fer », ce qui laisse possiblement penser que l'assiette sera attirée par l'aimant au même titre que le clou. L'ensemble des items était présenté visuellement et verbalement aux élèves avant le début de chaque tâche.

Suivant le paradigme d'amorçage négatif présenté précédemment, les différents items étaient agencés de manière à former 18 essais contrôle (amorce neutre et cible congruente) et 18 essais test (amorce incongruente et cible congruente). Cependant, pour certaines tâches, la nature des conceptions intuitives et des concepts scientifiques faisait en sorte qu'il était impossible d'avoir des items neutres, des items congruents et des items incongruents se répondant par OUI et par NON. Par exemple, pour la tâche

portant sur le magnétisme, il était impossible que la réponse soit OUI pour les items neutres. En effet, les items neutres devaient être des éléments qui n'activent pas la conception intuitive « tous les métaux sont attirés par les aimants ». Les items neutres retenus pour cette tâche sont donc l'arc-en-ciel et le feu, des éléments qui ne sont pas susceptibles d'amener l'élève à activer sa conception intuitive, ni même à penser à du métal. En considérant les quatre tâches, il a été possible de trouver des amorces neutres et des amorces incongruentes se répondant par NON, ainsi que des cibles congruentes se répondant par OUI. En outre, ce qui avait été identifié préalablement comme un inconvénient s'est finalement avéré être un atout pour les analyses. En comparant des temps de réponse pour des items se répondant par OUI entre eux (les amorces) et des temps de réponse se répondant par NON entre eux (les cibles), la critique à l'effet que répondre OUI est plus rapide et peut, par conséquent, biaiser les résultats peut être écartée.

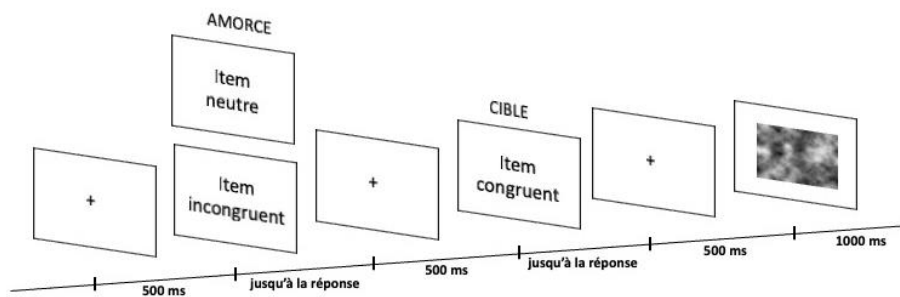
Afin de prévenir l'anticipation des réponses ou l'*effet d'habitation* (Wagner et Boakes, 1979) qui pourrait apparaître puisque tous les essais en amorce se répondent par OUI et que tous les essais en cible se répondent par NON, 24 essais supplémentaires (« *fillers* ») ont été ajoutés à chacune des tâches. Grâce à des essais supplémentaires, un participant ne pouvait pas détecter un quelconque patron dans l'organisation des essais. Ainsi, chacune des quatre tâches était composée de : 18 essais test (NON en amorce; OUI en cible), 18 essais contrôle (NON en amorce; OUI en cible), 18 essais fillers (OUI en amorce; NON en cible), 3 essais fillers (NON en amorce; NON en cible) et 3 essais fillers (OUI en amorce; OUI en cible). Pour les quatre tâches, les participants appuyaient autant de fois sur OUI (60 fois) que sur NON (60 fois). En tout, 39 essais commençaient par NON et 21 commençaient par OUI, de sorte que 35% des essais commençaient par OUI, ce qui s'avère un ratio convenable afin d'éviter l'anticipation des réponses. Parmi les dix items contenus dans chaque tâche, sept items sont inclus dans les analyses et ils apparaissaient chacun 12 fois dans les tâches. Les trois items servant de fillers apparaissaient des nombres distincts de fois puisque ceux-ci ont été choisis de manière à équilibrer le nombre de OUI et de NON en fonction de chacune des tâches. Comme les mêmes essais et les mêmes items se répétaient plusieurs fois, les essais ont été regroupés en trois blocs afin d'éviter que plus de deux essais identiques ne se succèdent. Ainsi, les différents essais étaient regroupés en 3 blocs de 20 essais chacun. Chaque bloc contenait 6 essais test, 6 essais contrôle et 8 essais supplémentaires répartis comme suit : 6 essais OUI en amorce-NON en cible, 1 essai NON en amorce-NON en cible, 1 essai OUI en amorce-OUI en cible.

En convergence avec les recherches utilisant le paradigme d'amorçage négatif, la présentation des différents items était séparée par une croix de fixation (500 ms) et les différents essais étaient séparés par

des masques visuels (1 000 ms) (voir par ex. Brault Foisy *et al.*, 2021). Le déroulement temporel des tâches est illustré à la Figure 3.5. En fonction de la vitesse des élèves, la durée des tâches pouvait varier légèrement, mais elles étaient conçues pour durer environ cinq minutes réparties comme suit :

- Essais : 60 essais de 2 items chacun : 120 items X 1 000 ms = 120 000 ms
- Croix de fixation : 500 ms par croix : 60 essais X 3 croix par essai X 500 ms = 90 000 ms
- Masques visuels : 1000 ms par masque : 60 masques X 1000 ms = 60 000 ms

Figure 3.5 Déroulement temporel des quatre tâches conçues selon le paradigme d'amorçage négatif



Un autre élément important à mentionner relativement à la conception des tâches concerne la formulation des consignes. Les consignes des quatre tâches étaient formulées de manière identique. De surcroît, dans les consignes des quatre tâches, il était demandé explicitement aux élèves de répondre *le plus rapidement possible*, tout en essayant de *ne pas faire d'erreur*. Effectivement, lorsque le temps pour répondre est limité, certaines personnes peuvent avoir tendance à répondre rapidement, mais en faisant plus d'erreurs. D'autres personnes privilégient la précision, mais sont un peu plus lentes (« *speed-accuracy trade-off* »; voir Heitz, 2014). Ainsi, les consignes intégrées aux tâches soulignaient l'importance de ces deux éléments : répondre rapidement, mais aussi, ne pas faire d'erreurs.

Afin d'uniformiser la manière de répondre, il était demandé aux élèves de positionner leurs deux index, soit les doigts les plus rapides de leurs mains (Aoki *et al.*, 2003), sous les boutons de réponse et d'utiliser exclusivement ces doigts pour répondre. Il était mentionné aux élèves que les mêmes items revenaient plusieurs fois durant les tâches et qu'en l'occurrence, s'ils se trompaient, ils avaient plusieurs chances de répondre correctement par la suite. Il leur était aussi expliqué qu'il était primordial de rester concentré et d'essayer de répondre le mieux possible jusqu'à la fin de la tâche. Pour chacune des tâches, cinq essais de pratique leur permettaient de se familiariser avec la nature de la tâche, la présentation visuelle des items,











le rythme de la tâche ainsi que le mode de réponse. Ce nombre d'essais était suffisant et permettait aux élèves de voir une fois chacun des dix stimuli.

Enfin, étant donné que les quatre tâches ont été conçues spécifiquement pour cette recherche, elles ont été prétestées auprès d'élèves 6^e année à trois reprises. Un premier prétest auprès de 9 élèves a permis de vérifier que les tâches fonctionnaient correctement, que les consignes et le mode de réponse étaient bien compris des enfants et que les items utilisés étaient suffisamment clairs. Ce prétest a aussi servi à vérifier si les élèves détectaient certaines régularités ou patrons dans l'agencement des essais et des items, ce qui n'était pas le cas. Deux autres prétests, menés auprès de 15 élèves au total, ont eu lieu afin d'ajuster le niveau de complexité des tâches. Par exemple, pour la tâche portant sur la flottabilité ($F \uparrow C \uparrow$), des substances plus contrastées ont été utilisées pour que les items congruents soient plus faciles. Effectivement, puisque la variable *complexité* est au cœur de cette recherche, les tâches ayant un niveau de *complexité* élevé devaient être suffisamment complexes pour que les élèves commettent des erreurs, mais pas trop complexes afin qu'ils soient en mesure de mobiliser leur contrôle inhibiteur afin de surmonter leurs conceptions intuitives à certains moments. Ces prétests ont aussi permis de confirmer qu'il était préférable de séparer l'expérimentation en deux séances (2 X 2 tâches) afin de favoriser un engagement cognitif soutenu de la part des élèves. Une fois la conception des tâches terminée, le protocole d'expérimentation complet, ainsi que l'ensemble des équipements techniques, ont été testés auprès d'une classe d'élèves volontaires de 6^e année ($n = 24$). Ce test s'est avéré concluant. Le contenu spécifique de chacune des quatre tâches est présenté plus en détail dans les quatre prochaines sous-sections.

3.2.2.2 Tâche 1 : Magnétisme

La première tâche conçue correspond à la condition expérimentale **1** ($F \downarrow C \downarrow$) et porte sur la paire de conceptions relative au magnétisme. Durant cette tâche, les élèves devaient analyser des items représentant des objets de leur quotidien. Les élèves devaient répondre à cette question : « Est-ce attiré par l'aimant ? ». La tâche était conçue de manière à ce que les élèves doivent parfois résister à la conception intuitive « tous les métaux sont attirés par les aimants ». Le concept scientifique qu'ils devaient mobiliser pour répondre correctement est « seuls certains métaux sont attirés par l'aimant ». Les 10 items utilisés dans cette première tâche sont présentés dans la Figure 3.6 ci-dessous.

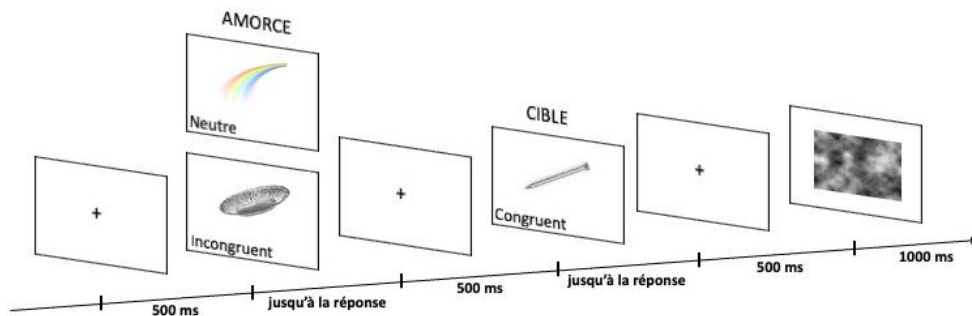
Figure 3.6 Items utilisés dans la tâche 1 portant sur le magnétisme

7 items inclus dans la tâche et dans les analyses		
Neutres	Incongruents	Congruents
Un arc-en-ciel 	Une assiette en aluminium 	Un trombone en fer 
Du feu 	Une bague en or 	Un clou en fer 
		Une cuillère en fer 
3 items supplémentaires (fillers)		
Neutres	Incongruents	Congruents
Un gros aimant 		Une paille en plastique 
		Un bâton de popcicle en bois 

Ces différents items étaient agencés selon le paradigme d’amorçage négatif, c’est-à-dire avec des essais test et des essais contrôle. Dans les essais contrôle, un item neutre était d’abord présenté à l’élève, c’est-à-dire un item pour lequel la conception intuitive « tous les métaux sont attirés par les aimants » n’était pas mobilisée. Par exemple, en voyant l’item « arc-en-ciel », un élève ne pensait probablement pas à des métaux ou à des non-métaux lorsqu’il analysait cet item et répondait à la question. Par la suite, un item congruent était présenté en cible, c’est-à-dire un item pour lequel l’élève activait, par hypothèse, la conception intuitive « tous les métaux sont attirés par les aimants ». L’activation de cette conception l’amenait à répondre correctement. Par exemple, pour l’item « clou », le clou est en métal et est effectivement attiré par l’aimant.

Dans la condition test, un item incongruent était présenté en amorce, c'est-à-dire un item pour lequel l'élève devait inhiber la conception intuitive « tous les métaux sont attirés par les aimants » pour répondre correctement. Par exemple, l'item « assiette en aluminium » demandait à l'élève de mobiliser son contrôle inhibiteur pour résister à sa conception intuitive qui est susceptible de l'amener à répondre que l'assiette est attirée par l'aimant puisqu'elle est faite à partir d'un métal qui, dans ce cas, n'est pas magnétique. Ensuite, un item congruent était présenté à l'élève, c'est-à-dire un item de même nature que celui qui a été présenté dans l'essai contrôle. Ici, lorsque l'élève voyait l'item « clou » apparaître, il devait réactiver la conception intuitive qu'il venait tout juste d'inhiber afin de répondre correctement. Le déroulement temporel des essais est illustré à la Figure 3.7 ci-dessous.

Figure 3.7 Déroulement temporel des essais pour la tâche 1





En terminant, l'ensemble des consignes de cette tâche, telles qu'elles ont été présentées aux élèves participants, peut être visualisé à l'Annexe D.

3.2.2.3 Tâche 2 : États solide et liquide

La deuxième tâche conçue correspond à la condition expérimentale 2 ($F \uparrow C \downarrow$) et porte sur la paire de conceptions relative aux états solide et liquide de la matière. Durant cette tâche, les élèves devaient analyser des items représentant de la matière dans différents états. Les élèves devaient répondre à cette question : « Est-ce un liquide ? ». La tâche était conçue de manière à ce que les élèves doivent parfois résister à la conception intuitive « les solides sont rigides ». Le concept scientifique qu'ils devaient mobiliser pour répondre correctement est « certains solides ne sont pas rigides ». Afin d'uniformiser la présentation des dix items, ils ont tous été présentés dans un verre transparent identique. Certains items utilisés ont été inspirés d'une tâche portant sur les solides et les liquides conçue par Babai et Amsterdamer (2008). Par contre, leur tâche n'était pas conçue selon le paradigme d'amorçage négatif et ne comportait

pas d'items neutres. Les 10 items utilisés dans cette deuxième tâche sont présentés dans la Figure 3.8 ci-dessous.

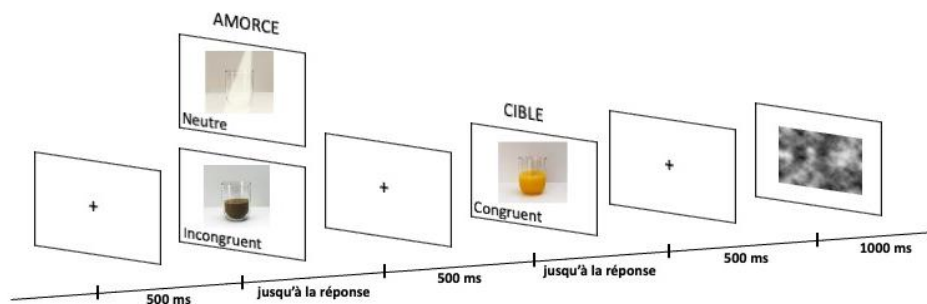
Figure 3.8 Items utilisés dans la tâche 2 portant sur les états solide et liquide de la matière

7 items inclus dans la tâche et dans les analyses		
Neutres	Incongruents	Congruents
Un faisceau de lumière 	De la pâte à modeler 	Du café 
Une flamme 	Du sable 	Du lait 
		Du jus d'orange 
3 items supplémentaires (fillers)		
Neutres	Incongruents	Congruents
	Du miel 	Une roche 
		Un morceau de bois 

Ces différents items étaient agencés selon le paradigme d’amorçage négatif. Dans les essais contrôle, un item neutre était d’abord présenté à l’élève, c’est-à-dire un item pour lequel la conception intuitive « les solides sont rigides » n’était pas mobilisée. Par exemple, en voyant l’item « faisceau de lumière », un élève ne pensait probablement pas à la rigidité d’un objet lorsqu’il analysait cet item et répondait à la question. Par la suite, un item congruent était présenté en cible, c’est-à-dire un item pour lequel l’élève activait, par hypothèse, la conception intuitive « les solides sont rigides ». L’activation de cette conception l’amenait à répondre correctement. Par exemple, pour l’item « jus d’orange », le jus n’est pas rigide, donc il n’est pas solide. Par conséquent, il est liquide.

Dans la condition test, un item incongruent était présenté en amorce, c’est-à-dire un item pour lequel l’élève devait inhiber la conception intuitive « les solides sont rigides » pour répondre correctement. Par exemple, l’item « sable » demandait à l’élève de mobiliser son contrôle inhibiteur pour résister à sa conception intuitive qui était susceptible de l’amener à répondre que le sable n’est pas solide puisqu’il n’est pas rigide. Le sable se verse, au même titre que les liquides. Ensuite, un item congruent était présenté à l’élève, c’est-à-dire un item de même nature que celui qui a été présenté dans l’essai contrôle. Ici, lorsque l’élève voyait l’item « jus d’orange » apparaître, il devait réactiver la conception intuitive qu’il venait tout juste d’inhiber afin de répondre correctement. Le déroulement temporel des essais est illustré à la Figure 3.8 ci-dessous.

Figure 3.9 Déroulement temporel des essais pour la tâche 2













En terminant, l’ensemble des consignes de cette tâche, telles qu’elles ont été présentées aux élèves participants, peut être visualisé à l’Annexe E.

3.2.2.4 Tâche 3 : Système Terre-Lune-Soleil

La troisième tâche conçue correspond à la condition expérimentale **3** (F ↓ C ↑) et porte sur la paire de conceptions relative au système Terre-Lune-Soleil. Durant cette tâche, les élèves devaient analyser des items représentant une portion de ciel sur laquelle apparaissaient toujours deux éléments susceptibles d'être observés dans le ciel. Ils devaient répondre à cette question : « Est-ce que ces deux éléments sont environ à la même distance de toi ? ». La tâche était conçue de manière à ce que les élèves doivent parfois résister à la conception intuitive « la Lune et le Soleil sont à des distances similaires de la Terre », impliquant par le fait même une règle intuitive plus générale, mais très prévalente : « plus c'est gros, plus c'est proche » (Babai *et al.*, 2006). Le concept scientifique qu'ils devaient mobiliser pour répondre correctement est « le Soleil est environ 400 fois plus loin de la Terre que la Lune » et, plus globalement, que ce n'est pas la grosseur qui détermine la distance à laquelle un objet se trouve. Dix éléments connus des élèves apparaissent deux par deux sur une portion de ciel de façon à former dix items qui sont présentés dans la Figure 3.10 ci-dessous.

Figure 3.10 Items utilisés dans la tâche 3 portant sur le système Terre-Lune-Soleil

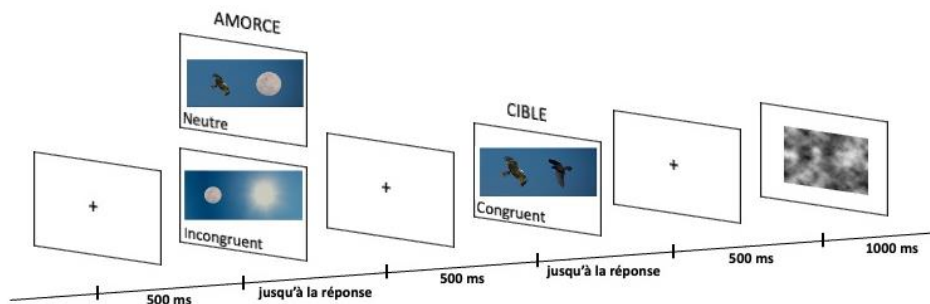
7 items inclus dans la tâche et dans les analyses		
Neutres	Incongruents	Congruents
Un aigle et la Lune 	La Lune et le Soleil 	Un aigle et un faucon 
Un Boeing et le Soleil 	Un faucon et un Airbus 	Un Boeing et un Airbus 
		Un morpho bleu et un monarque 
3 stimuli supplémentaires (fillers)		
Neutres	Incongruents	Congruents
		Saturne et la Lune 
		Un Airbus et un morpho bleu 
		Un cumulus et un cumulus 

Ces différents items étaient agencés selon le paradigme d’amorçage négatif. Dans les essais contrôle, un item neutre était d’abord présenté à l’élève, c’est-à-dire un item pour lequel la conception intuitive « plus c’est gros, plus c’est proche » n’était pas mobilisée. Par exemple, en voyant l’item « aigle et lune » sur lequel les deux éléments sont représentés de la même grosseur, un élève ne pensait probablement à la grosseur d’un objet lorsqu’il analysait cet item et répondait à la question. Les items neutres impliquaient toujours un élément céleste (par ex. : Lune, Soleil) et un élément terrestre (par ex. : avion, oiseau), ce qui

permet de supposer que l'élève considère de facto l'élément céleste comme étant beaucoup plus éloigné. Par la suite, un item congruent était présenté en cible, c'est-à-dire un item pour lequel l'élève activait, par hypothèse, la conception intuitive « plus c'est gros, plus c'est proche ». L'activation de cette conception l'amenait à répondre correctement. Par exemple, pour l'item « aigle et faucon », les deux éléments étaient représentés de la même grosseur, il n'y en a pas un qui était plus gros que l'autre. Par conséquent, l'élève pouvait utiliser sa conception intuitive pour évaluer leur distance.

Dans la condition test, un item incongruent était présenté en amorce, c'est-à-dire un item pour lequel l'élève devait inhiber la conception intuitive « plus c'est gros, plus c'est proche » pour répondre correctement. Par exemple, l'item « Lune et Soleil » demandait à l'élève de mobiliser son contrôle inhibiteur pour résister à sa conception intuitive qui est susceptible de l'amener à répondre que la Lune et le Soleil sont à des distances similaires puisque les deux semblent de la même grosseur lorsqu'il les observe dans le ciel. Ensuite, un item congruent était présenté à l'élève, c'est-à-dire un item de même nature que celui qui a été présenté dans l'essai contrôle. Ici, lorsque l'élève voyait l'item « aigle et faucon » apparaître, il devait réactiver la conception intuitive qu'il venait tout juste d'inhiber afin de répondre correctement. Le déroulement temporel des essais est illustré à la Figure 3.11 ci-dessous.

Figure 3.11 Déroulement temporel des essais pour la tâche 3








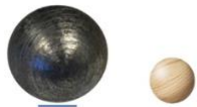

En terminant, l'ensemble des consignes de cette tâche, telles qu'elles ont été présentées aux élèves participants, peut être visualisé à l'Annexe F.


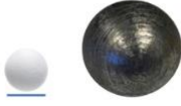


3.2.2.5 Tâche 4 : Flottabilité

La dernière tâche conçue correspond à la condition expérimentale **4** (F ↑ C ↑) et porte sur la paire de conceptions relative à la flottabilité. Durant cette tâche, les élèves devaient analyser des items représentant des balles se distinguant par leur masse, leur volume et/ou leur substance. Les élèves

devaient répondre à cette question : « Est-ce que la balle de gauche coule davantage que la balle de droite ? ». La tâche était conçue de manière à ce que les élèves doivent parfois résister à la conception intuitive « les objets lourds coulent davantage que les objets légers ». Le concept scientifique qu'ils devaient mobiliser pour répondre correctement est « les objets ayant une masse volumique plus élevée coulent plus que les objets ayant une masse volumique plus faible ». Les items utilisés dans cette tâche ont été inspirés par ceux de tâches existantes portant la flottabilité utilisées par Potvin et al. (2015a), Lafortune (2013) et par Brault Foisy et al. (2021). Par contre, la présente tâche se distingue puisque les tâches de Lafortune (2013) et de Potvin et ses collaborateurs (2015) n'étaient pas conçues selon le paradigme d'amorçage négatif. Quant à la tâche de Brault Foisy et ses collaborateurs (2021), elle était conçue selon le paradigme d'amorçage négatif, mais portait sur la conception intuitive « les gros objets coulent davantage ». Néanmoins, les mêmes substances ont été retenues dans la présente étude : le fer, le verre, le bois et la styromousse puisqu'il s'agit de substances généralement connues des élèves. Ainsi, les items de cette quatrième tâche sont constitués de balles, grosses ou petites, formées des substances nommées ci-haut. Les balles étaient présentées deux par deux de façon à former les 10 dix items qui sont présentés dans la Figure 3.12 ci-dessous. Afin d'alléger la charge cognitive liée à la question à laquelle les élèves devaient répondre, la balle de gauche était soulignée en bleu sur tous les items. Cette ligne bleue a été ajoutée suite aux commentaires des élèves lors du prétest de la tâche.

Figure 3.12 Items utilisés dans la tâche 4 portant sur la flottabilité

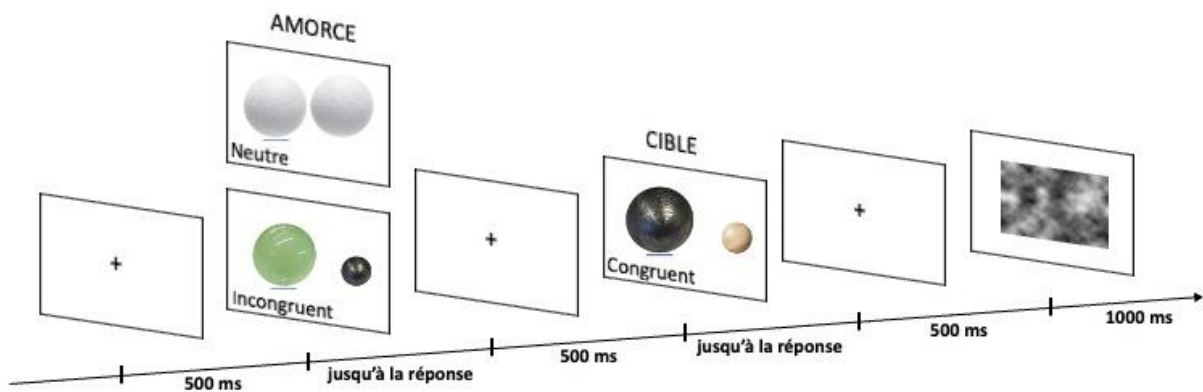
7 items inclus dans la tâche et dans les analyses		
Neutres	Incongruents	Congruents
Petite balle de fer et petite balle de fer 	Grosse balle de verre et petite balle de fer 	Grosse balle de bois et petite balle de styromousse 
Grosse balle de styromousse et grosse balle de styromousse 	Grosse balle de bois et petite balle de verre 	Grosse balle de fer et petite balle de bois 
		Grosse balle de verre et petite balle de styromousse 

		
3 stimuli supplémentaires (<i>fillers</i>)		
Neutres	Incongruents	Congruents
		Petite balle de styromousse et grosse balle de fer 
		Petite balle de bois et grosse balle de verre 
		Grosse balle de verre et grosse balle de styromousse 

Ces différents stimuli étaient agencés selon le paradigme d’amorçage négatif. Dans les essais contrôle, un item neutre était d’abord présenté à l’élève, c’est-à-dire un item pour lequel la conception intuitive « les objets lourds coulent davantage que les objets légers » n’était pas mobilisée. Par exemple, en voyant l’item « grosse balle de styromousse et grosse balle de styromousse » sur lequel deux balles sont identiques, un élève ne pensait probablement pas à la masse (ou même au volume) des balles lorsqu’il analysait cet item et répondait que la balle de gauche ne coule pas davantage. Par la suite, un item congruent était présenté en cible, c’est-à-dire un item pour lequel l’élève activait, par hypothèse, la conception intuitive « les objets lourds coulent davantage que les objets légers ». L’activation de cette conception l’amenait à répondre correctement. Par exemple, pour l’item « grosse balle de fer et petite balle de bois », la balle de fer est plus lourde (et plus grosse) que la balle de bois. Par conséquent, l’élève pouvait utiliser sa conception intuitive pour répondre que la balle de gauche, soit celle qui est la plus lourde, coule davantage.

Dans la condition test, un item incongruent était présenté en amorce, c'est-à-dire un item pour lequel l'élève devait inhiber la conception intuitive « les objets lourds coulent davantage que les objets légers » pour répondre correctement. Par exemple, l'item « grosse balle de verre et petite balle de fer » demandait à l'élève de mobiliser son contrôle inhibiteur pour résister à sa conception intuitive qui était susceptible de l'amener à répondre que la grosse balle de verre coule davantage puisqu'elle est un peu plus lourde. Elle était aussi plus grosse. Ensuite, un item congruent était présenté à l'élève, c'est-à-dire un item de même nature que celui qui avait été présenté dans l'essai contrôle. Ici, lorsque l'élève voyait l'item « grosse balle de fer et petite balle de bois » apparaître, il devait réactiver la conception intuitive qu'il venait tout juste d'inhiber afin de répondre correctement. Le déroulement temporel des essais est illustré à la Figure 3.13 ci-dessous.

Figure 3.13 Déroulement temporel des essais pour la tâche 4



L'ensemble des consignes de cette tâche, telles qu'elles ont été présentées aux élèves participants, peut être visualisé à l'Annexe G. En terminant, la réflexion entourant la conception des quatre tâches, de même que leur conception sur Gorilla, s'est déroulée sur une période de six mois. Plusieurs personnes ayant des expertises différentes ont contribué à leur conception. La section qui suit présente la troisième phase de la méthodologie, soit la passation des tâches cognitives dans les écoles.

3.3 Phase 3 : Passation des tâches cognitives

La troisième phase de cette recherche représente le cœur de la méthodologie, c'est-à-dire la passation des tâches cognitives auprès d'élèves du 3^e cycle du primaire.

3.3.1 Critères de sélection des participants

Les participants ont d'abord été recrutés en fonction de deux critères simples : 1- avoir 10 à 12 ans et 2- être scolarisés dans une classe ordinaire du 3^e cycle du primaire. Les élèves ayant des difficultés d'apprentissage ou un profil particulier n'ont pas été exclus afin que l'échantillon soit représentatif des caractéristiques variées des élèves au primaire. Le 3^e cycle a été choisi, car les élèves de ce cycle ont reçu un début d'enseignement formel des sciences, ce qui fait en sorte qu'ils connaissent suffisamment les concepts scientifiques sélectionnés par le panel de didacticiens pour pouvoir les mobiliser et répondre correctement. Le fait de pouvoir répondre correctement était important, car seules les réponses correctes ont été considérées dans les analyses étant donné que seules celles-ci sont représentatives d'une mobilisation réussie du contrôle inhibiteur et peuvent, en l'occurrence, servir à le mesurer et à le caractériser.

3.3.2 Modalités de recrutement et d'échantillonnage

Pour déterminer la taille de l'échantillon, une analyse de puissance statistique a été réalisée a priori en utilisant le logiciel G*Power 3.1.9.2 (Faul *et al.*, 2009). Cette analyse indiquait qu'un minimum de 19 participants était requis pour détecter une taille d'effet moyenne de 0,25 (Cohen, 1988) pour une analyse de variance (ANOVA) à mesures répétées : 2 (Type d'amorce [facteur intra-sujet] : Contrôle ou Test) x 2 (Familiarité [facteur intra-sujet] : Faible ou Élevée) x 2 (Complexité [facteur intra-sujet] : Faible ou Élevée) avec une puissance (1- β) de 0,80 et un seuil α de 0,05. Les ANOVA à mesures répétées nécessitent un échantillon moins grand que l'ANOVA classique (Girden, 1992). En outre, des études utilisant des tâches cognitives similaires menées auprès d'élèves du 3^e cycle ont été consultées (par ex. Brault Foisy *et al.*, 2021; Brault Foisy *et al.*, en révision). Ces études utilisaient les données de 30 à 50 élèves. Ainsi, l'objectif de recrutement de la présente étude a été fixé à 120 élèves dans l'optique d'obtenir suffisamment de données au terme de la collecte. Comme cette recherche impliquait deux visites en classe, l'absence de certains élèves à l'une ou l'autre des visites était anticipée. Un autre élément qui justifie l'objectif de recrutement assez élevé concerne le niveau de *complexité* de deux des quatre tâches. Les prétests qui ont été effectués confirment que les tâches qui portent sur des concepts scientifiques ayant un niveau de *complexité* élevée sont réellement complexes. Pour ces deux tâches, certains élèves rataient systématiquement tous les items incongruents. Il était donc envisagé que certains élèves participent, mais que leurs données soient inutilisables pour fins d'analyses en raison du faible taux de réponses correctes.

Les élèves ont été recrutés dans les écoles publiques du Centre de services scolaire de Montréal (CSSDM) puisqu'il s'agit de la population la plus accessible. Conformément aux procédures du CSSDM, une demande d'expérimentation a été déposée le 28 juillet 2022 et acceptée le 7 novembre 2022. Une fois la demande d'expérimentation acceptée par le Comité d'éthique du CSSDM, celui-ci a fait parvenir notre matériel de recrutement aux directions d'établissement qui l'ont transmis aux enseignants du 3^e cycle de leur école. L'ensemble du matériel de recrutement utilisé dans cette étude peut être consulté à l'*Annexe A*. Du matériel de recrutement destiné à être diffusé sur les réseaux sociaux que consultent généralement les enseignants avait été prévu et approuvé par le CIEREH, mais il n'a pas été nécessaire de l'utiliser. Par la suite, le CSSDM nous a communiqué le nom de deux enseignantes qui souhaitaient participer, tandis qu'une autre enseignante et ses cinq collègues nous ont contactés directement. Ainsi, huit enseignants ont accepté d'accueillir notre équipe de recherche dans leur classe.

Les enseignants ont expliqué à leurs élèves qu'ils étaient invités à participer à une recherche scientifique, s'ils le souhaitaient. Ils ont transmis à leurs élèves et à leurs parents une lettre d'information à laquelle était joint un formulaire de consentement (voir *Annexe H*). Les élèves et les parents intéressés ont rempli le formulaire de consentement et l'ont retourné à l'enseignant de leur enfant, qui a ensuite fait le suivi avec l'équipe de recherche. Au total, 171 élèves et leurs parents ont signé le formulaire de consentement. De ce nombre, 17 n'ont pas pu participer pleinement à la recherche, car ils étaient absents lors de l'une ou l'autre de nos visites dans leur classe. Ensuite, les données de 26 élèves ont dû être retirées pour diverses raisons : 12 élèves ne respectaient pas les consignes et le protocole d'expérimentation, sept élèves ont été victimes d'un problème technique lié au Wifi ou à Gorilla et six élèves ont mis un terme à leur participation en cours de route.

Bien que 128 élèves du 3^e cycle aient complété les quatre tâches, les analyses statistiques ont pu être réalisées seulement à partir des données des participants qui ont suffisamment réussi les quatre tâches. Pour réussir suffisamment les quatre tâches, les participants devaient 1- être capable d'inhiber les conceptions intuitives en jeu et 2- connaître les concepts scientifiques impliqués dans les tâches. Les données collectées montraient que, outre la difficulté à inhiber certaines conceptions intuitives, certains participants ne connaissaient pas du tout les concepts impliqués dans les tâches. Les données collectées montraient aussi que certaines tâches étaient difficiles pour les élèves du primaire. Par contre, comme la variable *complexité* est au cœur de la présente étude, la faible performance des élèves, notamment aux items incongruents, était prévisible. Ainsi, les données des participants qui ont été conservées pour les

analyses statistiques sont celles des participants qui ont réussi le tiers ou plus des essais pour chacune des tâches et chacune des conditions (pour un total de 32 mesures par participant). Ce seuil a été fixé dans l’optique que les moyennes calculées pour les temps de réponse tiennent compte d’un nombre suffisant d’essais. Un test-t unilatéral (« one-tail t-test ») a été effectué pour les participants dont la performance (taux de réponses correctes) était comprise entre 0,4 et 0,6 à la fois aux items congruents et aux items incongruents pour une même tâche afin de valider que ceux-ci comprenaient réellement la tâche et ne répondaient pas au hasard ($M_{\text{performance}} \neq 0,50$). Cette procédure a mené à l’exclusion de trois participants : deux qui semblent ne pas avoir compris la tâche portant sur la flottabilité ($t(69) = 1,445; p = 0,153$ pour les deux) et un autre pour la tâche portant sur le système Terre-Lune-Soleil ($t(69) = 0,475; p = 0,636$). Ainsi, l’échantillon final utilisé pour les analyses est composé de 45 participants, soient ceux qui avaient des connaissances scientifiques suffisantes pour répondre adéquatement et qui étaient capables d’inhiber les conceptions intuitives activées par les quatre tâches. Les caractéristiques de l’échantillon final sont présentées au Tableau 3.5.

Tableau 3.5 Caractéristiques de l’échantillon final ($n = 45$)

Sexe	Niveau scolaire	Âge moyen
Garçons	23 5 ^e année	19 11,55 (0,53)
Filles	22 6 ^e année	26

Bien que ce nombre soit moins élevé que le nombre d’élèves total ayant participé à l’étude, l’analyse de puissance statistique réalisée à priori montrait qu’un minimum de 19 participants était requis pour détecter une taille d’effet moyenne.

3.3.3 Déroulement de la collecte de données

La collecte de données s’est déroulée en avril 2023. La passation des tâches cognitives a eu lieu dans les classes participantes, durant les heures d’école régulières. Ce choix avait été fait de manière à rejoindre un grand nombre d’élèves plus facilement. Deux rendez-vous ont été pris de manière individuelle avec les enseignants dont les élèves participaient, de façon à s’adapter aux moments qui leur convenaient le mieux.

Lors des rencontres, deux auxiliaires de recherche se sont déplacées dans les écoles primaires avec une flotte de 30 tablettes électroniques (iPad) préalablement chargées, 30 paires de coquilles antibruit, ainsi qu’un point d’accès sans fil. La présence des deux auxiliaires s’est avérée essentielle afin d’être efficace

dans la gestion du matériel et la prise de notes. Afin de réduire les variables confondantes, les auxiliaires ont suivi exactement le même protocole d'expérimentation dans les huit classes. Ce protocole peut être consulté à l'*Annexe I*.

Lors de la première rencontre, les auxiliaires se sont présentées aux élèves et leur ont expliqué brièvement le projet, son déroulement et la participation attendue des élèves. Les auxiliaires ont pris le temps de répondre aux questions des élèves. À la suite de cela, les auxiliaires ont distribué à chaque élève une paire de coquilles antibruit, un carton sur lequel était écrit son numéro de participant (code alphanumérique) et une tablette. Les consignes des différentes tâches étaient présentées visuellement sur les tablettes et lues oralement par les auxiliaires qui se sont assurées que les élèves suivaient et comprenaient suffisamment chacune des consignes. Dans la majorité des classes, la collaboration des enseignants était optimale; ceux-ci se sont assurés que les élèves respectaient bien les consignes, ce qui était essentiel afin de contrôler les facteurs liés à l'environnement qui pourraient influencer la collecte de données. Lors de la première rencontre, les élèves ont commencé par remplir un bref questionnaire sociodémographique leur demandant leur niveau scolaire, leur date de naissance et le genre auquel ils s'identifient, puis ils ont effectué deux tâches de sciences. Durant la passation des tâches, les auxiliaires se sont assurées que les élèves positionnaient correctement leurs deux index sous les boutons de réponse afin que tous répondent de la même manière. Lors de la deuxième rencontre, les élèves ont effectué les deux autres tâches de sciences. Chacun des groupes a effectué les tâches dans un ordre différent attribué aléatoirement. Les rencontres en classe ont duré entre 30 et 60 minutes, selon la dynamique des groupes. Les données comportementales (temps de réponse et exactitude des réponses) ont été enregistrées, comme prévu. Les auxiliaires ont noté le numéro des participants qui ne respectaient pas les consignes de façon systématique afin de retirer ces élèves.

Les élèves qui ne souhaitaient pas participer à cette recherche ou qui n'avaient pas rapporté leur formulaire de consentement signé se sont occupés de manière silencieuse et autonome, à la discrétion de leur enseignant. Les auxiliaires de recherche ont remercié chaleureusement les élèves pour leur participation et l'enseignant pour son accueil. Au terme de la participation de leur groupe, chaque enseignant a reçu une carte-cadeau de 100 \$, destinée à l'achat de matériel pédagogique, en guise de compensation pour son temps et sa collaboration. En somme, la collecte de données s'est déroulée sans problème particulier. La section qui suit présente la quatrième phrase de la méthodologie, soit les modalités d'analyse des données collectées dans les huit classes.

3.4 Phase 4 : Modalités d'analyse des données

L'analyse des données, qui s'est déroulée en mai 2023, comportait trois grandes étapes : le traitement des données téléchargées de Gorilla et les analyses descriptives, l'analyse des moyennes pour les items en amorce et l'analyse des moyennes pour les items en cible. Ces trois grandes étapes seront décrites dans les paragraphes qui suivent.

D'abord, les données ont été téléchargées de Gorilla, traitées sur Excel version 16.72 et analysées sur JASP version 0.17.2. Les temps de réponse (mesurés en ms) et l'exactitude des réponses (réponses correctes ou incorrectes) ont été enregistrés séparément pour les items en amorce et en cible pour chacune des conditions (test et contrôle) durant la passation des quatre tâches. Les données incomplètes, c'est-à-dire celles des participants qui ont été absents ou qui ont abandonné durant la collecte, ainsi que celles des participants qui ont été victimes d'un problème technique, ont été retirées. Également, les données correspondant aux 24 essais supplémentaires, qui visaient à rendre les quatre tâches équivalentes et à éviter l'effet d'anticipation, ont été retirées.

Des statistiques descriptives ont d'abord été réalisées (moyennes et écarts-types) pour les temps de réponse (ms) et pour la performance (taux de réponses correctes) aux items en amorce et en cible pour les conditions test et contrôle, et ce, pour chacune des quatre tâches. Puis, en convergence avec la logique du paradigme d'amorçage négatif, seules les données correspondant aux essais réussis (cible réussie, précédée d'une amorce réussie) ont été conservées pour les étapes qui suivent. Afin de pouvoir étudier l'effet des variables qui influencent la mobilisation du contrôle inhibiteur (mesuré par l'effet d'amorçage négatif), les élèves devaient d'abord réussir à inhiber la conception intuitive en jeu (amorce réussie), puis être capables de fournir une réponse correcte (cible réussie). C'est ce qui permet de mesurer l'effet de l'amorce sur la cible (Borst *et al.*, 2013a).

Par la suite, pour chaque participant, les temps de réponse qui se situaient à plus ou moins deux écarts-types de leurs moyennes ont été exclus des analyses, ce qui est une procédure couramment utilisée dans des recherches similaires utilisant les temps de réponse comme mesure du contrôle inhibiteur (voir par ex. Borst *et al.*, 2013b; Brault Foisy *et al.*, 2021; Viarouge *et al.*, 2019). En effet, des temps de réponse anormalement élevés peuvent souvent être attribués à des distractions qui ont ralenti l'élève. À l'inverse, des temps de réponse anormalement bas peuvent être causés par un manque de réflexion de la part de l'élève ou à une réponse donnée machinalement. Qu'ils soient trop rapides ou trop lents, ces temps de

réponse ne reflètent pas les processus cognitifs habituellement impliqués dans le traitement de l'information et la réponse donnée par l'élève. Qui plus est, la moyenne est une mesure très sensible aux données extrêmes ou éloignées (Haccoun et Cousineau, 2010); ceux-ci nuisent à la puissance statistique et à la possibilité de détecter des effets qui devraient l'être (McKoon et Ratcliff, 1992). Dans cette même perspective, des seuils plancher (« *cutoff* », Ratcliff, 1993) de 200 ms et plafond de 5 000 ms ont été ajoutés afin d'éliminer les données des élèves qui pourraient ne pas avoir fait la tâche sérieusement (pour un ex. lié à une tâche scolaire en amorçage négatif, voir Borst *et al.*, 2015). Les données retirées correspondent à 5,24 % des données et amorce et à 4,24 % des données en cible, ce qui est conforme aux recommandations de Ratcliff (1993) qui considère qu'un retrait de 5 à 10 % des données est approprié.

Par la suite, les temps de réponse moyens (ms) et la performance (taux de réponses correctes) de chaque participant pour chacune des conditions et chacune des tâches ont été rapportés en un seul fichier afin de procéder aux analyses de variance (ANOVA). Bien que certaines études en amorçage négatif utilisent le score d'efficacité inverse (« *inverse efficiency score* »; voir Bruyer et Brysbaert, 2011) afin de combiner les temps de réponse et la performance en une seule variable dépendante, son utilisation n'était pas recommandée dans le contexte de la présente étude puisque la performance moyenne des élèves se situe sous 0,85 pour certains types d'items et certaines tâches (Bruyer et Brysbaert, 2011).

L'ANOVA a été retenue comme choix d'analyse afin de comparer les temps de réponse et la performance pour les différentes conditions en une seule analyse, ce qui est recommandé plutôt que de réaliser plusieurs test-t successivement (Field, 2009; Haccoun et Cousineau, 2010), en plus de contrôler le risque d'erreur de type α sans augmenter le risque d'erreur de type β pour autant. Plus précisément, des ANOVA à mesures répétées ont été utilisées puisque l'objectif des analyses était d'étudier l'effet de variables sur la mobilisation du contrôle inhibiteur chez les mêmes élèves, mais sous différentes conditions. L'ANOVA à mesures répétées est tout indiquée pour analyser les effets de variables indépendantes (la *familiarité* et la *complexité*) sur des variables dépendantes continues (les temps de réponse et la performance) (Field, 2009; Girden, 1992). Qui plus est, l'ANOVA à mesures répétées est plus puissante que l'ANOVA classique, car elle permet de contrôler la variabilité individuelle et d'exploiter l'information provenant des mesures répétées pour détecter des effets plus subtils (Girden, 1992). Girden (1992) décrit aussi l'ANOVA à mesures répétées comme un choix d'analyse judicieux pour les chercheurs qui souhaitent examiner les effets d'une amorce sur une cible. Enfin, le choix des mesures répétées s'avère pertinent pour contrebalancer la variabilité qui existe entre les élèves quant à l'efficacité de leurs fonctions exécutives (Zelazo *et al.*, 2016).

Les tailles d'effets ont été rapportées en termes d'êta-carré partiel (η^2_p). Le seuil de significativité a été fixé à 0,05, comme cela est couramment le cas dans les recherches en sciences humaines (Haccoun et Cousineau, 2010). De plus, comme cette recherche revêt un certain caractère exploratoire étant donné qu'il s'agit, à notre connaissance, de la première recherche à comparer le recours au contrôle inhibiteur pour des contenus scientifiques différents, un seuil trop strict de l'ordre de 0,01 aurait pu empêcher de voir de premières différences émerger. Un dernier élément à mentionner est que comme les mesures répétées comportaient seulement deux niveaux pour chaque variable, il n'a pas été nécessaire d'effectuer un test de sphéricité en guise de prémisse (Field, 2009; Girden, 1992).

La première partie des analyses de variance a porté sur les items en **amorce** et visait à dégager des **effets d'interférence**, c'est-à-dire des différences significatives quant à la performance et aux temps de réponse entre les items neutres et incongruents. Une ANOVA à mesures répétées **2** (facteur intra-sujet 'type d'amorce' : neutre ou incongruent) **x 2** (facteur intra-sujet 'familiarité' : faible ou élevé) **x 2** (facteur intra-sujet 'complexité' : faible ou élevé) ayant comme variable dépendante la **performance** aux items en **amorce** a été réalisée. Les effets globaux de l'ANOVA ont été rapportés (Girden, 1992; Navarro et Foxcroft, 2019), puis l'interaction a été décomposée afin de tester les effets simples du type d'amorce (Girden, 1992), qui représente la variable d'intérêt pour cette première partie des analyses dans laquelle l'objectif est de dégager des différences quant à la performance pour les items neutres et incongruents. Les effets simples du type d'amorce s'obtiennent en fixant les niveaux des deux autres variables indépendantes (Girden, 1992). Les effets simples ont permis d'identifier l'effet du type d'amorce en fonction des niveaux faible et élevé des variables *familiarité* et *complexité*. Ensuite, une seconde ANOVA a été réalisée en utilisant les mêmes paramètres, mais ayant cette fois comme variable dépendante les **temps de réponse** en **amorce**. Ici aussi, les effets globaux ont été rapportés, puis l'interaction a été décomposée afin de tester les effets simples du type d'amorce en fixant les niveaux des deux autres variables indépendantes.

La deuxième partie des analyses a porté sur les items en **cible** et visait spécifiquement à dégager des **effets d'amorçage négatif**, c'est-à-dire des différences significatives quant aux temps de réponse et à la performance aux items congruents présentés en cible. L'effet d'amorçage négatif est considéré représentatif de la mobilisation du contrôle inhibiteur. Cette deuxième partie des analyses avait également pour objectif de dégager plus spécifiquement les effets des variables *familiarité* et *complexité* afin de voir si ces variables ont une incidence sur l'effet d'amorçage négatif. Pour ce faire, une ANOVA à mesures répétées **2** (facteur intra-sujet 'type d'amorce' : neutre ou incongruent) **x 2** (facteur intra-sujet

'familiarité' : faible ou élevé) **x 2** (facteur intra-sujet 'complexité' : faible ou élevé) ayant comme variable dépendante la **performance en cible** a été réalisée. Comme pour la première partie des analyses, les effets globaux de l'ANOVA ont été rapportés et l'interaction a été décomposée subséquemment afin de tester les effets simples de chaque variable en fixant les niveaux des deux autres. L'analyse des effets simples du type d'amorce a permis de dégager des effets d'amorçage négatif. L'analyse des effets simples des variables *familiarité* et *complexité* ont servi à révéler si celles-ci ont une incidence sur les effets d'amorçage négatif relevés. Par la suite, une autre ANOVA a été réalisée avec les mêmes paramètres, mais ayant cette fois comme variable dépendante les **temps de réponse en cible**. La même procédure a été suivie, soit rapporter les effets globaux de l'ANOVA, puis effectuer l'analyse des effets simples du type d'amorce, de la *familiarité* et de la *complexité*.

Par la suite, les **effets d'amorçage négatif** ont été calculés pour la performance en cible en effectuant cette soustraction : performance en cible précédée par une amorce incongruente – performance en cible précédée par une amorce neutre. Les effets d'amorçage négatif ont été calculés de la même manière pour les temps de réponse. Conformément aux hypothèses de recherche, il était attendu que les effets d'amorçage négatif soient de moins grande amplitude pour la condition 1 (F ↓ C ↓) et de plus grande amplitude pour la condition 4 (F ↑ C ↑). L'amplitude des effets d'amorçage négatif est représentative d'une mobilisation plus ou moins importante du contrôle inhibiteur.

Les modalités d'analyse retenues ont fait l'objet d'une rencontre avec un statisticien-expert en analyses multiniveaux de manière à confirmer que celles-ci étaient adaptées à la question de recherche et que les effets d'interaction avaient été décomposés adéquatement. Enfin, un dernier élément à mentionner est que les données collectées et analysées dans le cadre de ce mémoire seront également analysées dans le cadre d'une recherche de plus grande envergure subventionnée par le CRSH (430-2020-00894).

3.5 Considérations éthiques

Cette recherche a reçu un certificat d'approbation éthique du CIEREH de l'UQAM (2022-4092). La réalisation de cette recherche ne soulevait pas d'enjeux particuliers au regard de l'éthique ni aucun risque ou inconvénient pour les participants.

3.5.1 Obtention du consentement éclairé

Avant de procéder à la collecte de données, les enseignants ont invité les élèves de leur groupe à participer à cette recherche, puis ils leur ont transmis la documentation expliquant le projet plus en détail. Tous les parents des élèves de ces groupes ont reçu une lettre d'invitation contenant les informations nécessaires pour comprendre la nature de la participation attendue de leur enfant. Étant donné que les élèves sont mineurs, ce sont leurs parents qui ont signé le formulaire de consentement, mais ceux-ci ont tout de même donné leur assentiment écrit (voir *Annexe H*). Il va de soi que la participation des élèves était libre et volontaire, ce qui signifie qu'en tout temps, les élèves étaient libres de mettre un terme à leur participation, et ce, sans avoir à fournir de justification. Six participants sont d'ailleurs mis fin à leur participation durant la collecte. Comme prévu, leurs données ont été détruites et n'ont pas été utilisées dans les analyses. L'équipe de recherche s'était réservé le droit de retirer un élève en cours de participation, si les circonstances le justifiaient. Par exemple, un élève qui ne respectait pas les consignes liées à sa participation pouvait être exclu. Également, lorsque les données recueillies auprès d'un élève étaient incomplètes et risquaient de compromettre la validité des résultats de la recherche, celles-ci étaient également retirées de l'étude.

3.5.2 Respect de la confidentialité et de l'anonymat

Il est attendu que les renseignements recueillis dans le cadre de la présente étude sont confidentiels et que tout a été fait et continuera de l'être afin de préserver l'anonymat des participants. De ce fait, le nom des enseignants, des directions et des écoles qui ont participé n'est pas identifié dans le présent mémoire et ne le sera pas dans les publications ultérieures. Lors de la collecte de données, un code alphanumérique a été attribué à chaque élève. La clé de ce code est conservée dans un fichier accessible uniquement sur l'ordinateur de la chercheuse qui dirige ce projet, qui est protégé par un mot de passe. Il n'est donc pas possible de faire le lien entre l'identification de l'élève et ses données. En ce qui a trait aux données, celles-ci sont conservées avec des identifiants codés sur l'ordinateur de la chercheuse qui dirige de projet qui est verrouillé par un mot de passe. Quant aux formulaires de consentement, qui sont en format papier, ils sont conservés dans un classeur verrouillé situé dans le bureau de la chercheuse qui dirige ce projet.

Au terme de cette recherche, les résultats seront diffusés de manière anonymisée, c'est-à-dire que tous les identificateurs directs auront été irrévocablement retirés de sorte qu'aucune identification ultérieure ne sera possible. Les renseignements identificatoires ainsi que les données seront conservés pour une durée de cinq ans. Au terme de ce délai, les données en format numérique seront détruites à l'aide d'un

logiciel spécialisé et les données en format papier seront déchetées par le Service d'archivage de l'UQAM.

CHAPITRE 4

RÉSULTATS

Ce chapitre fait état des résultats de cette recherche. Ceux-ci seront présentés en deux sections distinctes : l'analyse des amorces, puis celle des cibles. L'objectif principal des analyses était de dégager l'effet individuel et combiné des variables *familiarité* et *complexité* sur la mobilisation du contrôle inhibiteur, telle que mesurée par l'amplitude de l'effet d'amorçage négatif. Les résultats seront présentés de manière à établir des liens entre les données, les résultats et les hypothèses de recherche.

4.1 Amorces

Le Tableau 4.1 qui suit présente les statistiques descriptives pour la performance aux items présentés en amorce. La présentation des moyennes et des écarts-types est organisée en fonction du type d'amorce et des niveaux faible et élevé des variables *familiarité* et *complexité*.

Tableau 4.1 Performance en amorce (taux de réponses correctes) en fonction du type d'amorce et des niveaux faible et élevé des variables familiarité et complexité

		V1 : Familiarité			
		Faible		Élevée	
Type d'amorce		V2 : Complexité			
		Faible	Élevée	Faible	Élevée
Neutre		0,98 (0,5)	0,92 (0,08)	0,93 (0,13)	0,89 (0,12)
	Incongruent	0,66 (0,23)	0,80 (0,2)	0,95 (0,1)	0,63 (0,18)

Note. Les écarts-types apparaissent entre parenthèses.

Une ANOVA à mesures répétées sur la **performance** en **amorce** montre un effet d'interaction entre le type d'amorce, le niveau de *familiarité* et le niveau de *complexité*; $F(1,44) = 73,818$; $p < 0,001$; $\eta^2_p = 0,627$. Les effets globaux de cette ANOVA sont présentés au Tableau 4.2. Comme une triple interaction est significative, elle a été décomposée afin de tester les effets simples du type d'amorce sur la performance en fixant les niveaux des deux autres variables indépendantes.

Tableau 4.2 Effets globaux de l'ANOVA à mesures répétées sur la performance en amorce

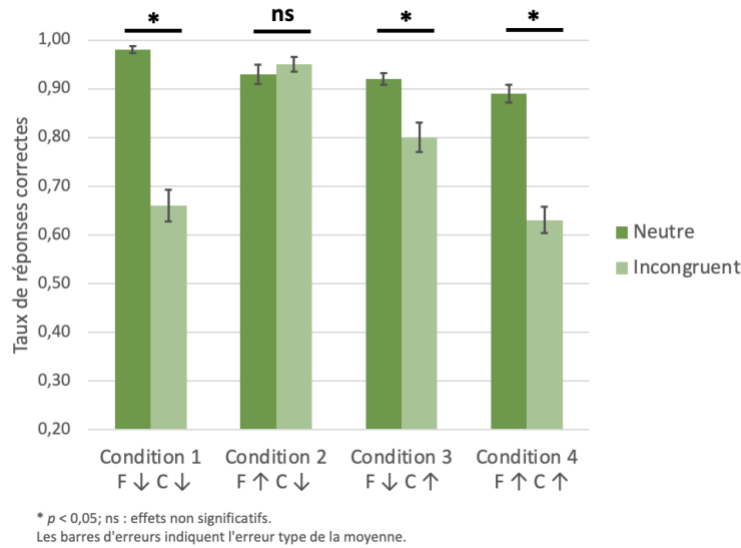
Cas	Somme des carrés	df	Moyenne des carrés	F	p	η^2_p
Type d'amorce	2,668	1	2,668	135,976	< 0,001	0,756
Familiarité	0,007	1	0,007	0,365	0,549	0,008
Complexité	0,462	1	0,462	20,538	< 0,001	0,318
Type d'amorce * Familiarité	0,220	1	0,220	13,836	< 0,001	0,239
Type d'amorce * Complexité	0,055	1	0,055	2,649	0,111	0,057
Familiarité * Complexité	1,090	1	1,090	48,551	< 0,001	0,525
Type d'amorce * Familiarité * Complexité	1,278	1	1,278	73,818	< 0,001	0,627

Note. Somme des carrés de type III

L'analyse des effets simples montre que le type d'amorce (Neutre ou Incongruent) a un effet sur la performance en amorce dans trois conditions expérimentales sur quatre. Lorsque le niveau de *familiarité* est faible et que le niveau de *complexité* est faible; $F(1,44) = 88,019$; $p < 0,001$ ou élevé; $F(1,44) = 22,559$; $p < 0,001$, le type d'amorce a un effet sur la performance. La performance est plus élevée pour les items neutres que pour les items incongruents. Le type d'amorce a aussi un effet lorsque le niveau de *familiarité* est élevé et que celui de la *complexité* l'est aussi; $F(1,44) = 71,154$; $p < 0,001$. Ici aussi, la performance est plus élevée lorsque l'amorce est un item neutre qu'un item incongruent. Toutefois, le type d'amorce n'a pas d'effet sur la performance lorsque la *familiarité* est élevée et la *complexité* faible; $F(1,44) = 1,063$; $p = 0,308$.

La Figure 4.1, placée ci-dessous, illustre l'effet du type d'amorce sur la performance en amorce en fonction des quatre conditions expérimentales. Le type d'amorce a un effet sur la performance pour trois conditions expérimentales, soit les conditions 1 (F ↓ C ↓), 3 (F ↓ C ↑) et 4 (F ↑ C ↑). La performance est plus faible aux items incongruents qu'aux items neutres.

Figure 4.1 Performance des élèves en amorce en fonction du type d'amorce



Le Tableau 4.3 qui suit présente les statistiques descriptives pour les temps de réponse aux items présentés en amorce. La présentation des moyennes et des écarts-types est organisée en fonction du type d'amorce et des niveaux faible et élevé des variables *familiarité* et *complexité*.

Tableau 4.3 Temps de réponse en amorce (ms) en fonction du type d'amorce et des niveaux faible et élevé des variables familiarité et complexité

		V1 : Familiarité			
		Faible		Élevée	
Type d'amorce		V2 : Complexité			
		Faible	Élevée	Faible	Élevée
Neutre	Neutre	716 (155)	1139 (338)	803 (195)	1010 (229)
	Incongruent	787 (169)	1100 (278)	765 (217)	1658 (503)

Note. Les écarts-types apparaissent entre parenthèses.

Une ANOVA à mesures répétées sur les **temps de réponse** en **amorce** montre un effet d'interaction significatif entre le type d'amorce, le niveau de *familiarité* et le niveau de *complexité*; $F(1,44) = 125,696$; $p < 0,001$; $\eta^2_p = 0,741$. Les effets globaux de cette ANOVA sont présentés au Tableau 4.4. Comme les effets globaux révèlent une triple interaction significative, celle-ci a été décomposée subséquemment afin de tester les effets simples du type d'amorce sur les temps de réponse en fixant les niveaux des deux autres variables indépendantes.

Tableau 4.4 Effets globaux de l'ANOVA à mesures répétées sur les temps de réponse en amorce

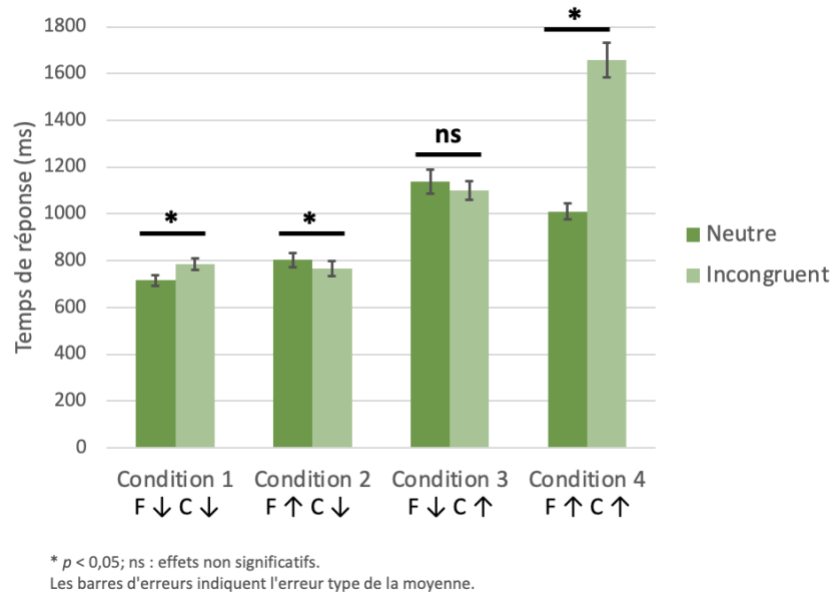
Cas	Somme des carrés	dl	Moyenne des carrés	F	p	η^2_p
Type d'amorce	2,309×10 ⁺⁶	1	2,309×10 ⁺⁶	95,507	< ,001	0,685
<i>Familiarité</i>	1,370×10 ⁺⁶	1	1,370×10 ⁺⁶	25,620	< ,001	0,368
<i>Complexité</i>	1,897×10 ⁺⁷	1	1,897×10 ⁺⁷	284,387	< ,001	0,866
Type d'amorce * <i>Familiarité</i>	1,877×10 ⁺⁶	1	1,877×10 ⁺⁶	70,125	< ,001	0,614
Type d'amorce * <i>Complexité</i>	1,865×10 ⁺⁶	1	1,865×10 ⁺⁶	73,546	< ,001	0,626
<i>Familiarité</i> * <i>Complexité</i>	749 846,944	1	749 846,944	9,931	0,003	0,184
Type d'amorce * <i>Familiarité</i> * <i>Complexité</i>	3,547×10 ⁺⁶	1	3,547×10 ⁺⁶	125,696	< ,001	0,741

Note : Somme des carrés de type III

L'analyse des effets simples indique que le type d'amorce a un effet sur les temps de réponse en amorce quand les niveaux de *familiarité* et de *complexité* sont faibles; $F(1,44) = 14,461$; $p < 0,001$ et quand les niveaux de *familiarité* et de *complexité* sont élevés; $F(1,44) = 125,682$; $p < 0,001$. Pour ces deux conditions, les temps de réponse pour les items incongruents sont significativement plus longs que pour les items neutres. Le type d'amorce a aussi un effet quand le niveau de *familiarité* est élevé et celui de la *complexité* faible; $F(1,44) = 7,788$; $p = 0,008$. Par contre, dans ce cas, les temps de réponse sont significativement plus élevés pour les items neutres que pour les items incongruents. Enfin, le type d'amorce n'a pas d'effet sur les temps de réponse lorsque le niveau de *familiarité* est faible et que celui de la *complexité* élevée; $F(1,44) = 1,914$; $p = 0,173$.

La Figure 4.2, placée ci-dessous, illustre l'effet du type d'amorce sur les temps de réponse en amorce en fonction des quatre conditions expérimentales. Le type d'amorce a un effet sur les temps de réponse pour trois conditions expérimentales. Les temps de réponse sont plus longs pour les items incongruents que pour les items neutres pour les conditions 1 (F ↓ C ↓) et 4 (F ↑ C ↑) et, à l'inverse, ils sont plus longs pour les items neutres que pour les items incongruents pour la condition 2 (F ↑ C ↓).

Figure 4.2 Temps de réponse des élèves en amorce en fonction du type d'amorce



Puisque plusieurs différences significatives sont observées sur les variables dépendantes en fonction du type d'amorce, il est possible de conclure à la présence d'effets d'interférence. Le Tableau 4.5 présente une synthèse des effets d'interférence observés en amorce.

Tableau 4.5 Synthèse des effets d'interférence observés en amorce

	Condition 1 F ↓ C ↓	Condition 2 F ↑ C ↓	Condition 3 F ↓ C ↑	Condition 4 F ↑ C ↑
Performance	0,32 (0,23)	ns	0,13 (0,18)	0,26 (0,21)
Temps de réponse	71 (124)	-38 (91)	ns	647 (387)

Note. Les effets rapportés sont significatifs au seuil $p < 0,05$; ns : effets non significatifs.

Comme des effets d'interférence sont bien présents, il convient de procéder aux analyses des items en cible afin d'étudier l'effet de l'amorce sur le traitement de la cible.

4.2 Cibles

Le Tableau 4.6 qui suit présente les statistiques descriptives pour la performance aux items présentés en cible. La présentation des moyennes et des écarts-types est organisée en fonction du type d'amorce et des niveaux faible et élevé des variables *familiarité* et *complexité*.

Tableau 4.6 Performance (taux de réponses correctes) en cible en fonction du type d'amorce et des niveaux faible et élevé des variables familiarité et complexité

		V1 : Familiarité			
		Faible		Élevée	
		V2 : Complexité			
		Faible	Élevée	Faible	Élevée
Type d'amorce précédant la cible	Neutre	0,93 (0,12)	0,94 (0,13)	0,97 (0,04)	0,91 (0,1)
	Incongruent	0,92 (0,13)	0,92 (0,14)	0,99 (0,03)	0,86 (0,14)

Note. Les écarts-types apparaissent entre parenthèses.

Une ANOVA à mesures répétées sur la **performance** en **cible** montre un effet d'interaction entre le type d'amorce, le niveau de *familiarité* et le niveau de *complexité*; $F(1,44) = 6,196$; $p = 0,017$; $\eta^2_p = 0,123$. Les effets globaux de cette ANOVA sont présentés au Tableau 4.7. Puisqu'il y a une interaction entre les trois variables, celle-ci a été décomposée afin de tester les effets simples du type d'amorce sur la performance en cible.

Tableau 4.7 Effets globaux de l'ANOVA à mesures répétées sur la performance en cible

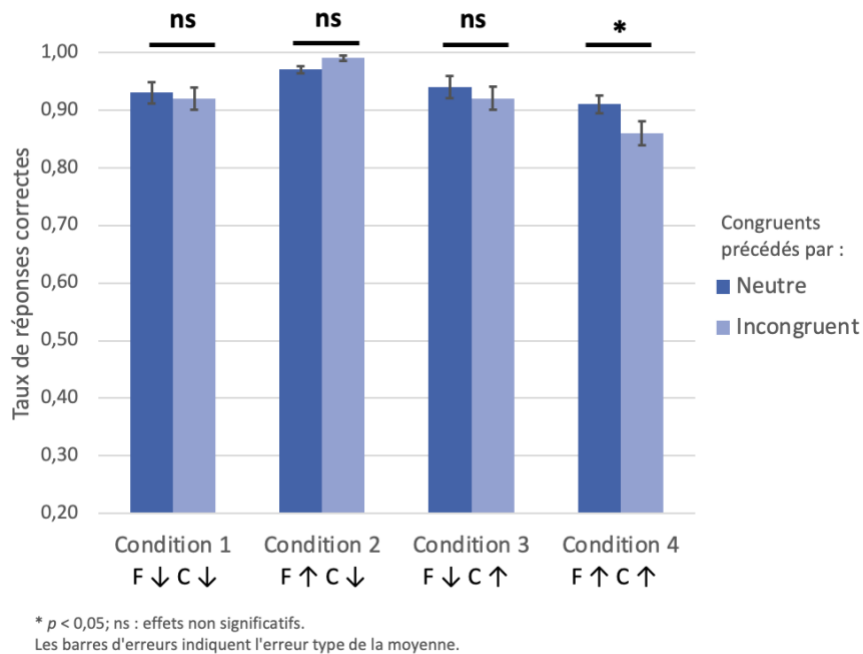
Cas	Somme des carrés	dl	Moyenne des carrés	F	p	η^2_p
Type d'amorce	0,018	1	0,018	7,108	0,011	0,139
Familiarité	0,003	1	0,003	0,131	0,719	0,003
Complexité	0,173	1	0,173	9,895	0,003	0,184
Type d'amorce * Familiarité	0,004	1	0,004	1,030	0,316	0,023
Type d'amorce * Complexité	0,033	1	0,033	10,321	0,002	0,190
Familiarité * Complexité	0,221	1	0,221	11,680	0,001	0,210
Type d'amorce * Familiarité * Complexité	0,018	1	0,018	6,196	0,017	0,123

Note. Somme des carrés de type III

L'analyse des effets simples montre que le type d'amorce (Neutre ou Incongruent) a un effet sur la performance en cible seulement lorsque les niveaux de *familiarité* et de *complexité* sont tous deux élevés; $F(1,44) = 13,281$; $p < 0,001$. La performance est plus faible pour les items congruents lorsqu'ils sont précédés d'items incongruents en amorce. Le type d'amorce n'a pas d'effet sur la performance dans les trois autres conditions : *familiarité* et *complexité* faible; $F(1,44) = 0,022$; $p = 0,884$, *familiarité* faible et *complexité* élevée; $F(1,44) = 0,988$; $p = 0,884$, *familiarité* élevée et *complexité* faible; $F(1,44) = 2,699$; $p = 0,108$.

La Figure 4.3, placée ci-dessous, illustre l'effet du type d'amorce sur la performance en cible en fonction des quatre conditions expérimentales. Le type d'amorce a un effet sur la performance pour la condition 4 (F ↑ C ↑). La performance en cible est plus faible lorsque des items incongruents précèdent les items congruents.

Figure 4.3 Performance des élèves en cible en fonction du type d'amorce



Les effets simples des variables *familiarité* et *complexité* sur la performance en cible ont aussi été testés. L'analyse des effets simples montre que le niveau de *familiarité* a un effet sur la performance en cible dans certains cas. Lorsque l'amorce est un item neutre, la *familiarité* a un effet sur la performance seulement lorsque le niveau de *complexité* est faible; $F(1,44) = 7,176$; $p = 0,01$. Une *familiarité* élevée augmente légèrement la performance comparativement à une *familiarité* faible. La *familiarité* n'a pas d'effet lorsque la *complexité* est élevée; $F(1,44) = 0,817$; $p = 0,371$. Lorsque le type d'amorce est un item incongruent, la *familiarité* a un effet, et ce, peu importe si le niveau de *complexité* est faible; $F(1,44) = 10,535$; $p = 0,002$ ou élevé; $F(1,44) = 4,527$; $p = 0,039$. Une *familiarité* élevée est associée à une performance plus faible lorsque la *complexité* est élevée et plus élevée lorsque la *complexité* est faible.

L'analyse des effets simples montre que le niveau de *complexité* a un effet sur la performance en cible lorsque le niveau de *familiarité* est élevé, et ce, que l'amorce soit neutre; $F(1,44) = 14,795$; $p < 0,001$ ou

incongruente; $F(1,44) = 34,545$; $p < 0,001$. Une *familiarité* élevée est associée à une performance plus faible si la *complexité* est élevée et plus élevée si la *complexité* est faible. À l’opposé, le niveau de *complexité* n’a pas d’effet sur la performance en cible lorsque le niveau de *familiarité* est faible, que l’amorce soit neutre; $F(1,44) = 0,222$; $p = 0,640$ ou incongruente; $F(1,44) = 3,064 \times 10^{-4}$; $p = 0,986$. Les paragraphes qui suivent présentent les résultats quant aux temps de réponse en cible.

Le Tableau 4.8 qui suit présente les statistiques descriptives pour les temps de réponse aux items présentés en cible. La présentation des moyennes et des écarts-types est organisée en fonction du type d’amorce et des niveaux faible et élevé des variables *familiarité* et *complexité*.

Tableau 4.8 Temps de réponse en cible (ms) en fonction du type d’amorce et des niveaux faible et élevé des variables *familiarité* et *complexité*

		V1 : Familiarité			
		Faible		Élevée	
		V2 : Complexité			
		Faible	Élevée	Faible	Élevée
Type d’amorce	Neutre	708 (193)	855 (196)	706 (192)	1251 (433)
	Incongruent	706 (173)	908 (259)	710 (202)	1314 (437)

Note. Les écarts-types apparaissent entre parenthèses.

Une ANOVA à mesures répétées sur les **temps de réponse** en **cible** montre un effet d’interaction entre le type d’amorce et niveau de *complexité*; $F(1,44) = 9,148$; $p = 0,004$; $\eta^2_p = 0,172$ ainsi qu’un second effet d’interaction, cette fois, entre le niveau de *familiarité* et de *complexité*; $F(1,44) = 52,303$; $p < 0,001$; $\eta^2_p = 0,543$. Les effets globaux de cette ANOVA sont présentés au Tableau 4.9 qui suit. Ces deux effets d’interaction ont été décomposés pour tester les effets simples de chaque variable en fixant les niveaux de l’autre.

Tableau 4.9 Effets globaux de l'ANOVA à mesures répétées sur les temps de réponse en cible

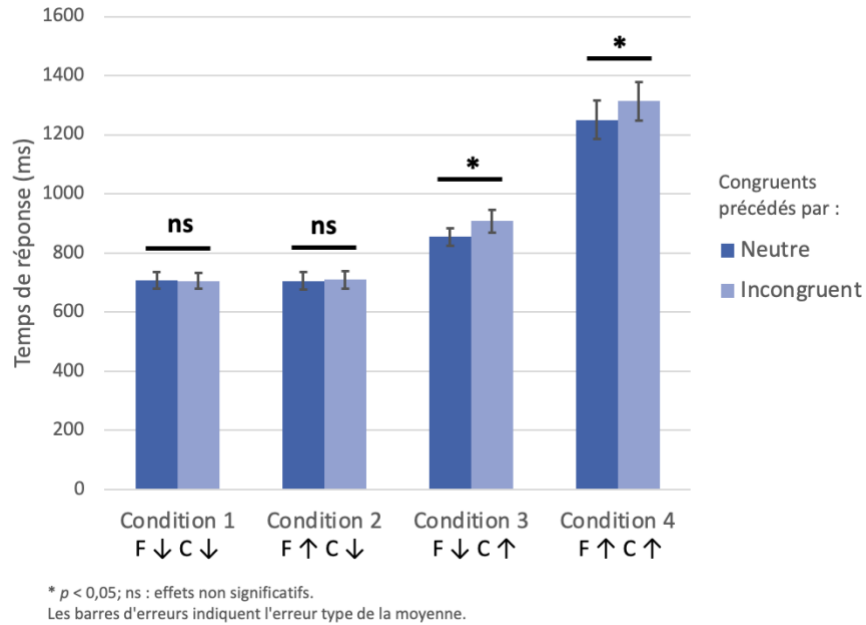
Cas	Somme des carrés	dl	Moyenne des carrés	F	p	η^2_p
Type d'amorce	78 647,336	1	78 647,336	8,374	0,006	0,160
Familiarité	$3,642 \times 10^{+6}$	1	$3,642 \times 10^{+6}$	47,185	< ,001	0,517
Complexité	$1,264 \times 10^{+7}$	1	$1,264 \times 10^{+7}$	179,714	< ,001	0,803
Type d'amorce * Familiarité	1 228,403	1	1 228,403	0,102	0,751	0,002
Type d'amorce * Complexité	73 359,225	1	73 359,225	9,148	0,004	0,172
Familiarité * Complexité	$3,602 \times 10^{+6}$	1	$3,602 \times 10^{+6}$	52,303	< ,001	0,543
Type d'amorce * Familiarité * Complexité	66,736	1	66,736	0,004	0,948	$9,699 \times 10^{-5}$

Note. Somme des carrés de type III

D'abord, en ce qui concerne la première interaction (type d'amorce*complexité), l'analyse des effets simples montre que le niveau de complexité a un effet sur les temps de réponse en cible, et ce, que l'amorce soit un item neutre; $F(1,44) = 149,173$; $p < 0,001$ ou incongruent; $F(1,44) = 173,470$; $p < 0,001$. Une complexité plus élevée est associée à des temps de réponse statistiquement plus élevés. Quant au type d'amorce, l'analyse des effets simples montre que celui-ci a un effet sur les temps de réponse en cible quand le niveau de complexité est élevé; $F(1,44) = 9,469$; $p = 0,004$. Les items incongruents présentés en amorce ont pour effet de ralentir le traitement des items en cible, ce qui s'observe par des temps de réponse plus longs en cible. Il y a donc un effet d'amorçage négatif pour les deux tâches ayant un niveau de complexité élevé. Par contre, le type d'amorce n'a pas d'effet sur les temps de réponse en cible quand la complexité est faible; $F(1,44) = 0,034$; $p = 0,855$. Il n'y a donc pas d'effet d'amorçage négatif pour les deux tâches ayant une faible complexité.

La Figure 4.4 présentée ci-dessous présente les temps de réponse en cible en fonction du type d'amorce. Pour les conditions 3 (F ↓ C ↑) et 4 (F ↑ C ↑), qui ont un niveau de complexité élevé, le type d'amorce a un effet sur le traitement de la cible. Une amorce incongruente a pour effet de ralentir le traitement de la cible. Pour les conditions 1 (F ↓ C ↓) et 2 (F ↑ C ↓), qui ont un faible niveau de complexité, le type d'amorce n'a pas d'influence sur les temps de réponse en cible.

Figure 4.4 Temps de réponse des élèves en cible en fonction du type d'amorce

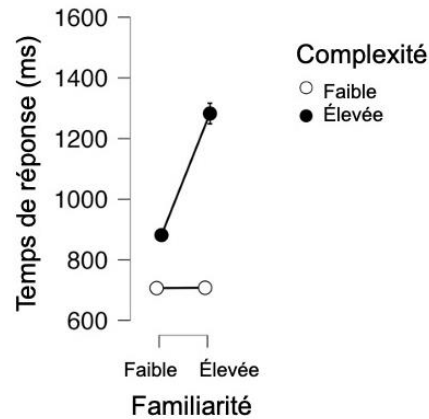


En ce qui concerne la seconde interaction (*familiarité*complexité*), l'analyse des effets simples montre que le niveau de *complexité* a toujours un effet sur les temps de réponse en cible, que le niveau de *familiarité* soit faible; $F(1,44) = 61,559$; $p < 0,001$ ou élevé; $F(1,44) = 127,201$; $p < 0,001$. Quand le niveau de *complexité* est élevé, les temps de réponse le sont aussi. Quand le niveau de *complexité* est faible, les temps de réponse sont moins élevés.

Quant au niveau de *familiarité*, l'analyse des effets simples montre que celui-ci a un effet sur les temps de réponse en cible lorsque le niveau de *complexité* est élevé; $F(1,44) = 56,682$; $p < 0,001$. Quand le niveau de *complexité* est élevé, un niveau élevé de *familiarité* a pour effet d'augmenter les temps de réponse en cible, tandis qu'un faible niveau de *familiarité* est associé à des temps de réponse moins élevés. Le niveau de *familiarité* n'a pas d'effet sur les temps de réponse en cible lorsque le niveau de *complexité* est faible; $F(1,44) = 0,003$; $p = 0,957$.

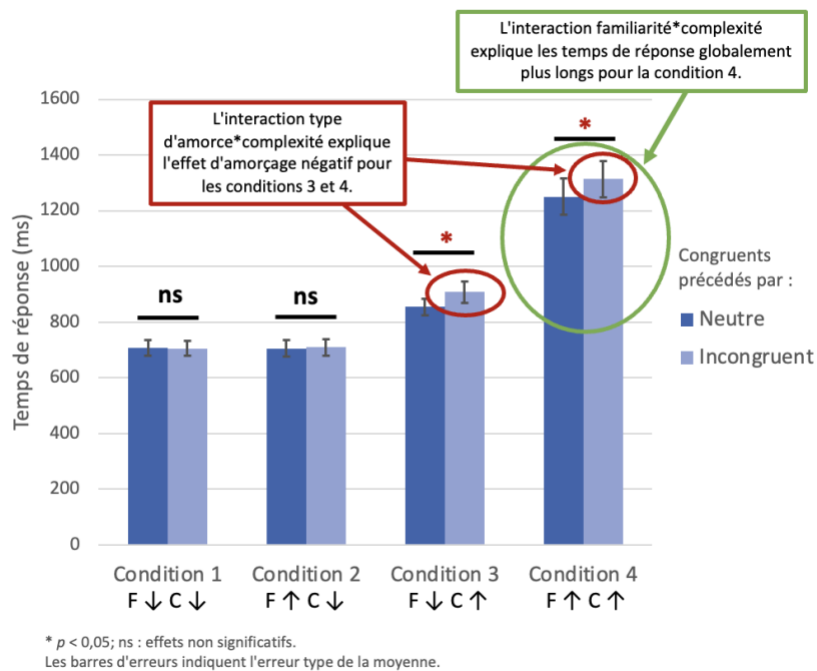
La Figure 4.5 illustre l'effet d'interaction entre le niveau de *familiarité* et le niveau de *complexité* sur les temps de réponse en cible. Quand le niveau de *complexité* est faible, le niveau de *familiarité* n'influence pas les temps de réponse. Par contre, quand le niveau de *complexité* est élevé, les temps de réponse en cible sont plus élevés si le niveau de *familiarité* est également élevé.

Figure 4.5 Effets d'interaction des variables familiarité et complexité sur les temps de réponse en cible



La Figure 4.6 se veut une synthèse des deux effets d'interaction observés sur les temps de réponse en cible, soit une interaction type d'amorce*complexité (**cercles rouges**; les temps de réponse en cible sont plus élevés lorsque précédés par une amorce incongruente pour les deux conditions ayant une complexité élevée) et une interaction complexité*familiarité (**cercle vert**; les temps de réponse sont globalement plus longs pour la condition 4 F↑ C↑ que pour les autres conditions).

Figure 4.6 Synthèse des deux effets d'interaction observés sur les temps de réponse en cible



Puisque le type d’amorce a des effets significatifs sur la performance et les temps de réponse en cible, on peut conclure que des effets d’amorçage négatif sont présents pour les conditions 3 (F↓C↑) et 4 (F↑C↑). Puisque des effets d’amorçage négatif sont présents, il convient de les calculer en effectuant la différence entre les temps de réponse des items en cibles (Temps de réponse aux items congruents précédés par incongruents – Temps de réponse aux items congruents précédés par neutres) et en effectuant le même calcul pour la performance. Les effets d’amorçage négatif, représentatifs de la mobilisation du contrôle inhibiteur, sont présentés au Tableau 4.10.

Tableau 4.10 Effets d’amorçage négatif dégagés pour les quatre conditions

	Condition 1 F ↓ C ↓	Condition 2 F ↑ C ↓	Condition 3 F ↓ C ↑	Condition 4 F ↑ C ↑
Performance	ns	ns	ns	0,06 (0,1)
Temps de réponse	ns	ns	54 (109)	63 (261)

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

En ce qui concerne les temps de réponse, un test-t pairé indique qu’il n’y a pas de différence significative entre les deux effets d’amorçage négatif; $t(44) = -0,197$; $p = 0,844$. Ainsi, en ce qui concerne la performance, un effet d’amorçage négatif est présent uniquement pour la condition 4 (F↑C↑). En ce qui a trait aux temps de réponse, aucun effet d’amorçage négatif significatif ne se dégage pour les conditions 1 et 2 (C ↓), tandis qu’un effet d’amorçage négatif est présent pour les conditions 3 et 4 (C ↑). Cet effet est statistiquement similaire pour ces deux conditions. Le chapitre qui suit vise à discuter et interpréter les résultats qui viennent d’être présentés de manière à répondre à la question de recherche et à vérifier les hypothèses qui avaient été émises au terme du cadre théorique.

CHAPITRE 5

DISCUSSION

Cette recherche vise à répondre à cette question : quelles sont les variables didactiques pouvant influencer la mobilisation du contrôle inhibiteur lors de l'apprentissage de concepts scientifiques au primaire auxquels sont associées des conceptions intuitives fréquentes ?

Au terme du cadre théorique, deux hypothèses de recherche avaient été émises au regard des possibles effets de deux variables, soit la *familiarité* des conceptions intuitives et la *complexité* des concepts scientifiques. La première hypothèse était que plus le niveau de *familiarité* d'une conception intuitive est faible et que plus le concept scientifique qui lui est associé a un faible niveau de *complexité*, moins la mobilisation du contrôle inhibiteur serait importante, ce qui s'observera par un effet d'amorçage négatif de plus faible amplitude. La seconde hypothèse était que plus une conception intuitive a un niveau élevé de *familiarité* et que plus le concept scientifique qui lui est associé à un niveau élevé de *complexité*, plus la mobilisation du contrôle inhibiteur serait importante, tel qu'observé par un effet d'amorçage négatif de plus grande amplitude. Ainsi, les hypothèses émises suggéraient que la mobilisation du contrôle inhibiteur était modulée à la fois par le niveau de *familiarité* de la conception intuitive à laquelle l'élève doit résister et par le niveau de *complexité* du concept scientifique qu'il doit mobiliser. Également, il avait été choisi de comparer quatre conditions correspondant au croisement des niveaux faible et élevé des deux variables afin de préciser le poids relatif de chacune d'elles. Toutefois, la littérature ne permettait pas d'établir d'hypothèses claires à ce sujet.

Ce chapitre vise à interpréter les résultats présentés préalablement et à les discuter au regard des écrits scientifiques afin de répondre à la question de recherche et de vérifier les hypothèses qui avaient été émises à la lumière du cadre théorique. D'abord, les principales différences observées lors de l'analyse des amorces seront discutées en lien avec les effets d'interférence dégagés pour chacune des conditions. Ensuite, les différences observées en ce qui a trait aux cibles feront l'objet d'une discussion, cette fois, en lien avec les effets d'amorçage négatif. L'influence des variables didactiques sur ceux-ci et, en l'occurrence, sur la mobilisation du contrôle inhibiteur sera aussi interprétée. Enfin, pour clore ce chapitre, les retombées scientifiques et les implications pédagogiques des résultats de cette recherche seront mises en évidence. Les limites de cette recherche et des pistes de recherche futures seront également suggérées.

5.1 Amorces et effets d'interférence

En convergence avec les études antérieures en amorçage négatif portant sur des contenus scolaires variés (Ahr *et al.*, 2016; Brault Foisy *et al.*, 2017; Brault Foisy *et al.*, 2021; Borst *et al.*, 2013b, 2014; Lubin *et al.*, 2013; Roëll *et al.*, 2019), plusieurs effets d'interférence ont été observés en amorce, c'est-à-dire des différences significatives quant à la performance et aux temps de réponse mesurés aux items neutres et aux items incongruents. Plus spécifiquement, pour trois des quatre tâches, la performance des élèves est plus faible aux items incongruents qu'aux items neutres. Également, les temps de réponse sont différents pour trois tâches expérimentales. La présence de ces effets d'interférence mène à deux constats principaux qui seront discutés ci-après : le premier concerne la conception des tâches dans lesquelles le contrôle inhibiteur est nécessaire et le second, l'effet d'interaction entre les variables *familiarité* et *complexité*.

D'abord, bien que les quatre tâches cognitives utilisées aient été conçues spécifiquement pour cette recherche, les temps de réponse et la performance aux items neutres et aux items incongruents sont conformes à ce qui est habituellement observé dans les tâches en sciences en amorçage négatif, notamment lorsque des conceptions intuitives doivent être inhibées (Brault Foisy *et al.*, 2021; Brault Foisy *et al.*, en révision). Nos résultats suggèrent donc que les items incongruents étaient réellement plus difficiles que les items neutres, probablement en raison de leur caractère contre-intuitif et du possible besoin d'inhiber une conception intuitive qui interfère avec un concept scientifique (Brault Foisy *et al.*, 2021). Cette prémisse selon laquelle les données collectées grâce aux quatre tâches conçues pour cette recherche reflètent des résultats habituellement observés est importante afin de pouvoir interpréter adéquatement les effets d'amorçage négatif.

Ensuite, les effets détectés sur les variables dépendantes sont différents d'une condition à l'autre, mettant ainsi en lumière l'effet d'interaction entre les variables *familiarité* et *complexité*. En ce qui concerne les deux conditions les plus opposées (condition 1 : F ↓ C ↓ et condition 4 : F ↑ C ↑), des effets d'interférence typiques sont observés sur les deux variables dépendantes : la performance est plus faible et les temps de réponse sont plus longs pour les items incongruents que pour les items neutres. Par ailleurs, en ce qui concerne la condition 4 (F ↑ C ↑), l'effet d'interférence observé sur les temps de réponse est plus marqué que pour la condition 1 (F ↓ C ↓) (648 ms vs 71 ms). Le niveau élevé des deux variables pour la condition 4 pourrait possiblement expliquer cette différence : le niveau élevé de *familiarité* pourrait expliquer pourquoi il est plus difficile pour l'élève de résister à sa conception intuitive (Millar, 1991; Ohlsson, 2009;

Potvin *et al.*, 2015a), tandis que le niveau élevé de *complexité* pourrait expliquer la difficulté à mobiliser le concept scientifique permettant de répondre adéquatement à la question posée (Bahar et Polat, 2007; Johnstone, 1991; Millar, 1991; Thouin, 2017).

Pour la condition 3 (F ↓ C ↑), un effet d'interférence est aussi observé, mais seulement sur la performance. Ceci pourrait s'expliquer par les niveaux des variables associés à cette condition : la *complexité* élevée du concept à mobiliser fait en sorte que la performance des élèves est affectée aux items incongruents, tandis que la faible *familiarité* de la conception intuitive pourrait faire en sorte que les élèves ont besoin d'autant de temps à analyser les items neutres que les items incongruents. Quoi qu'il en soit, il n'est pas nécessaire que les temps de réponse et la performance soient tous deux affectés pour conclure à la présence d'un effet d'interférence (voir par ex. Ahr *et al.*, 2017).

Le cas de la condition 2 (F ↑ C ↓) est particulier pour deux raisons. Premièrement, aucune différence n'est observée quant à la performance. Les élèves réussissent aussi bien les items neutres que les items incongruents, ce qui suggère qu'ils maîtrisent très bien le concept à mobiliser, soit les états solide et liquide de la matière. Le niveau de *complexité* de ce concept est d'ailleurs faible, ce qui peut expliquer la performance élevée des élèves du primaire malgré leur jeune âge. Les états solide et liquide de la matière font aussi partie du curriculum en sciences dès le 1^{er} cycle du primaire (Gouvernement du Québec, 2006a, p. 149); ainsi, il est possible de supposer que les élèves du 3^e cycle qui ont pris part à cette recherche aient eu le temps de consolider l'apprentissage de ce concept et que cela ait contribué à leur performance élevée en amorce. La deuxième particularité de cette condition concerne les temps de réponse : ceux-ci sont significativement plus longs pour les items neutres que pour les items incongruents (802 ms vs 765 ms), ce qui n'est pas un résultat habituel. Une piste d'explication serait que la *familiarité* élevée de la conception intuitive peut faire en sorte que les élèves sont habitués à évaluer l'état solide ou liquide de substances qui sont solides ou liquides et, possiblement, de résister à la conception intuitive familière qui était au cœur de la tâche. D'ailleurs, Smolleck et Hershberger (2011) rapportent que dès l'âge de 4 ans, les enfants entretiennent des conceptions intuitives quant aux états solide (« les solides ne se cassent pas », p. 11) et liquide (« les liquides se boivent », p. 11) de la matière, tout en étant en mesure d'identifier correctement plusieurs solides et liquides. En présentant aux élèves des items neutres qui n'étaient ni des solides ni des liquides, notre intention était que les élèves n'activent pas leur conception intuitive, mais en fait, la présentation de ces items a peut-être créé un effet de surprise qui a eu pour effet d'allonger le traitement de l'information requis pour évaluer l'état solide ou liquide de ceux-ci. Lorsqu'un élément

inhabituel est détecté par le cortex cingulaire antérieur, cela crée un effet de surprise (Botvinick, 2007; Bush *et al.*, 2000). Il est possible qu'après l'analyse des items neutres moins familiers ou inhabituels, l'élève fournisse une réponse correcte, faisant en sorte que sa performance n'est pas affectée, contrairement aux temps de réponse qui, eux, sont plus longs.

Globalement, les résultats obtenus en amorce appuient l'hypothèse que le contrôle inhibiteur est sollicité pour répondre correctement aux items incongruents. La mobilisation du contrôle inhibiteur est associée à temps de réponse plus longs et à une performance plus faible (Kelemen *et al.*, 2013; Kelemen et Rosset, 2009) et c'est ce qui est observé dans la majorité des conditions expérimentales de cette recherche, au même titre que dans d'autres études portant sur le contrôle inhibiteur et l'apprentissage des sciences (par ex. Allaire-Duquette *et al.*, 2019; Brookman-Byrne *et al.*, 2018; Potvin et Cyr, 2017; Vosniadou *et al.*, 2018b). Également, des effets d'interaction ont aussi été observés entre les variables *familiarité* et *complexité* en amorce, ce qui suggère que l'effet de la *familiarité* dépend du niveau de *complexité* et/ou que l'effet de la *complexité* dépend du niveau *familiarité*. Cette interaction observée en amorce joue peut-être un rôle dans le traitement des items présentés en amorce, mais il n'est pas exclu que cela se répercute en cible compte tenu la nature du paradigme utilisé.

La prochaine section discute les résultats obtenus en cible, notamment en ce qui a trait aux effets des amorces sur les cibles, afin d'interpréter les effets d'amorçage négatif. Les effets des variables *familiarité* et *complexité* sur les effets d'amorçage négatif, représentatifs de la mobilisation du contrôle inhibiteur, seront également abordés plus en détail dans cette section. Il importe de toujours garder à l'esprit que les items présentés en cible sont exclusivement des items congruents et qu'ils sont identiques. La seule distinction réside donc dans le type d'amorce qui les précède.

5.2 Cibles et effets d'amorçage négatif

En ce qui a trait aux cibles, les résultats obtenus sont en partie convergents avec les résultats d'études antérieures en amorçage négatif (Ahr *et al.*, 2016, 2017; Brault Foisy *et al.*, 2017, 2021; Borst *et al.*, 2013b, 2014; Lubin *et al.*, 2013; Roëll *et al.*, 2019). Dans deux des quatre conditions expérimentales, l'amorce a des effets sur le traitement de la cible. Par ailleurs, il convient de préciser que puisque deux variables dépendantes ont été mesurées, les effets des amorces sur les cibles ne sont pas exactement les mêmes selon si on considère la performance ou les temps de réponse. Plus spécifiquement, pour la condition 4 (F ↑ C ↑), les items en cible qui suivent une amorce incongruente sont moins bien réussis que lorsqu'ils

suivent une amorce neutre. Pour les conditions 3 ($F \downarrow C \uparrow$) et 4 ($F \uparrow C \uparrow$), les temps de réponse des items en cible qui suivent une amorce incongruente sont plus longs que lorsque l'amorce est neutre. Ainsi, des effets d'amorçage négatif typiques sont observés pour ces deux conditions, c'est-à-dire un ralentissement du traitement de la cible et une diminution de la performance (Borst *et al.*, 2013a; Tipper, 1985, 2001). Ces effets d'amorçage négatif suggèrent que les élèves doivent inhiber leurs conceptions intuitives lorsque l'amorce est un item incongruent et que l'effort cognitif déployé à cette fin se répercute sur le traitement de la cible lorsque ceux-ci doivent réactiver leurs conceptions intuitives (Brault Foisy *et al.*, 2021; Brault Foisy *et al.*, en révision; Potvin *et al.*, 2015a).

Qui plus est, que l'on considère les temps de réponse ou la performance, les résultats suggèrent que le niveau de *complexité* des concepts scientifiques à mobiliser influence significativement l'effet d'amorçage négatif. Dans le cadre de cette recherche, la *complexité* est définie comme l'ensemble des critères relatifs au niveau d'abstraction, à la charge cognitive, à la complexité sémantique et à la complexité contextuelle associées aux concepts scientifiques que les élèves doivent apprendre. Les concepts scientifiques peuvent donc avoir différents niveaux de *complexité* en fonction de ces critères.

Certains pourraient avoir des réserves quant à cette interprétation, notamment en croyant que la conception des tâches cognitives associées aux concepts plus complexes faisait en sorte qu'elles étaient plus exigeantes pour les élèves, ce qui ne s'avère pas complètement faux. Il est vrai qu'évaluer si une balle coule davantage qu'une autre (condition 4 : $F \uparrow C \uparrow$) implique que l'élève réalise une comparaison entre deux objets, ce qui n'est pas le cas lorsqu'il faut évaluer si un objet est attiré par un aimant (condition 1 : $F \downarrow C \downarrow$). Les tâches de comparaison sont d'ailleurs documentées pour être plus difficiles que les tâches exigeant seulement une réaction motrice (Kosinski, 2008). Ainsi, la complexité des tâches en tant que telles, qui est d'ailleurs intimement liée à la *complexité* des concepts qui doivent être mobilisés par les élèves, peut effectivement expliquer pourquoi les temps de réponse sont globalement plus élevés pour les conditions 3 et 4 ($C \uparrow$) que pour les conditions 1 et 2 ($C \downarrow$). Par contre, cela n'explique pas un élément crucial, soit la présence ou l'absence d'un effet d'amorçage négatif, qui est dégagé en comparant des temps de réponse pour des items congruents qui, quant à eux, sont identiques au sein d'une tâche.

Cette découverte selon laquelle la *complexité* influence l'effet d'amorçage négatif est cohérente avec une recherche récente menée par Lin et ses collègues (2023) auprès d'étudiants universitaires qui apprennent la cinématique. Ces chercheurs se sont intéressés aux difficultés rencontrées par les étudiants lors de la

résolution de problèmes qui nécessitent de mobiliser adéquatement les concepts de position, de vitesse et d'accélération. Une conception intuitive selon laquelle « un objet qui en dépasse un autre se déplace à la même vitesse que celui-ci au moment exact du dépassement » interfère souvent avec les concepts à mobiliser et doit être inhibée pour réussir à résoudre les problèmes (Lin *et al.*, 2023). Ces chercheurs ont obtenu des temps de réponse élevés (entre 4021 et 5994 ms pour les items congruents qui suivent des amorces variées) ainsi que des effets d'amorçage négatif de très grande amplitude (664 ms et 1973 ms, respectivement en fonction des amorces incongruentes et très incongruentes). Ces effets sont beaucoup plus grands que ceux observés dans d'autres études menées auprès d'adultes, mais portant sur des concepts scientifiques moins complexes (par ex. 51 ms dans l'étude portant sur la flottabilité de Brault Foisy *et al.*, 2021; 30 ms dans l'étude sur le vivant de Brault Foisy *et al.*, en révision). Lin et ses collègues (2023) concluent leur étude en suggérant que « l'activation de connaissances scientifiques plus complexes et la suppression de conceptions initiales nécessitent un plus grand degré de contrôle inhibiteur. (...) [Ils stipulent que leur] étude fournit également des preuves préliminaires que le degré de contrôle inhibiteur requis peut être associé à la *complexité* des connaissances scientifiques et/ou des conceptions erronées. » (Lin *et al.*, 2023, p. 11, traduction libre).

Outre l'étude de Lin et ses collègues (2023), il ne semble pas y avoir d'autres études qui ont traité directement du contrôle inhibiteur en lien avec la *complexité* des concepts scientifiques à mobiliser. Toutefois, une étude d'Avgerinou et Tolmie (2019) s'est intéressée à l'effet de la charge cognitive sur le contrôle inhibiteur dans le contexte de l'apprentissage des fractions et des nombres décimaux chez les élèves du primaire (8-10 ans). Ces deux apprentissages sont connus pour être contre-intuitifs et nécessiter le contrôle inhibiteur pour résister au biais des nombres entiers (« *whole number bias* », voir par ex. Obersteiner *et al.*, 2013 pour les fractions; Roëll *et al.*, 2019 pour les nombres décimaux). La tâche utilisée par Avgerinou et Tolmie (2019) comportait différents types d'items qui visaient à moduler la charge cognitive en ajoutant des distracteurs visuels (ajout d'illustrations de soutien et ajouts d'illustrations comportant des informations supplémentaires) susceptibles d'amener l'élève à partager son attention entre différents éléments. Les résultats de leur étude indiquent « une relation plus nuancée entre le contrôle inhibiteur et les concepts contre-intuitifs reliés aux fractions et aux nombres décimaux que celle présumée par les recherches précédentes » (Avgerinou et Tolmie, 2019, p. 252, traduction libre). Entre autres, Avgerinou et Tolmie (2019) suggèrent que le rôle du contrôle inhibiteur n'est pas constant et qu'il est sollicité surtout à des niveaux élevés de charge cognitive. Bien que ces chercheurs aient modulé la charge cognitive avec des distracteurs visuels plutôt qu'avec des contenus ayant des niveaux de *complexité*

différents comme cela a été fait dans cette recherche, des convergences intéressantes apparaissent considérant que, dans la présente étude, un effet d'amorçage négatif a été observé seulement pour les conditions ayant une *complexité* élevée. Qui plus est, les résultats obtenus par Avgerinou et Tolmie (2019) suggèrent aussi que des variables relatives aux contenus à apprendre influencent le contrôle inhibiteur. Effectivement, nonobstant la charge cognitive qui était modulée durant leur tâche, les temps de réponse et la performance observés ne sont pas les mêmes pour les fractions et les nombres décimaux, et ce, même si l'automatisme en jeu est le même dans les deux cas. En somme, les études de Lin et ses collègues (2023) et d'Avgerinou et Tolmie (2019) offrent des pistes d'interprétation pertinentes et cohérentes avec les résultats obtenus pour les conditions 3 (F ↓ C ↑) et 4 (F ↑ C ↑).

Les recherches portant sur la mémoire de travail et la charge cognitive offrent également des pistes d'interprétation complémentaires aux effets d'un niveau élevé de la variable *complexité* sur l'effet d'amorçage négatif. Il est généralement admis que la mémoire de travail peut traiter un nombre limité d'éléments simultanément (Baddeley, 1994; Cowan, 2000; Miller, 1956; Peterson et Peterson, 1959; Sweller *et al.*, 1998; Sweller *et al.*, 2019). Il est aussi admis qu'un concept complexe est plus difficile à mobiliser et à manipuler et qu'il occupe davantage d'espace dans la mémoire de travail (Sweller *et al.*, 1998; Sweller *et al.*, 2019). Qui plus est, dans le contexte de l'apprentissage des sciences, des concepts complexes peuvent aussi impliquer que des conceptions inattendues surgissent (Potvin *et al.*, 2015a). En ce sens, certains auteurs suggèrent que l'ensemble des conceptions demeurent dans la mémoire de travail lorsque l'élève évalue laquelle choisir (Brookman-Byrne *et al.*, 2018). Ainsi, il est possible que plusieurs conceptions – intuitives et/ou scientifiques – occupent la mémoire de travail simultanément. Or, si les concepts scientifiques qui doivent être mobilisés par la mémoire de travail sont complexes, l'espace occupé par ceux-ci est possiblement plus important. Pour l'élève qui doit raisonner et accomplir une tâche, une charge cognitive plus élevée en résulte. Ainsi, il est possible que l'effet d'amorçage négatif soit plus élevé quand le concept à mobiliser a un niveau de *complexité* plus élevé en raison de la charge cognitive supplémentaire engendrée par des concepts ayant un niveau de *complexité* élevé. La charge cognitive est d'ailleurs l'un des indicateurs ayant servi à évaluer le niveau de *complexité* des concepts par le panel de didacticiens. En considérant les conditions 3 et 4 ensemble, cet indicateur est celui qui avait la moyenne la plus élevée parmi les quatre indicateurs; sa moyenne était de 4,43. À titre comparatif, les moyennes des autres indicateurs étaient les suivantes : 4,3 pour l'abstraction, 3,95 pour la complexité sémantique et 4,1 pour la complexité contextuelle. Ainsi, l'indicateur « charge cognitive » est peut-être celui qui contribue le mieux à définir le niveau de *complexité* d'un concept.

Les études portant sur l'identification des fonctions exécutives suggèrent aussi des pistes d'interprétation supplémentaires. En ce sens, Diamond (2013) établit des liens importants entre le contrôle inhibiteur et la mémoire de travail qu'elle considère comme étant les deux fonctions exécutives principales. En effet, ces deux fonctions sont souvent appelées à œuvrer de concert : la mémoire de travail est impliquée lorsqu'une personne doit maintenir un objectif en tête, pendant que le contrôle inhibiteur permet de réduire l'interférence posée par les distracteurs pour atteindre l'objectif. Ainsi, bien que le paradigme retenu pour concevoir les tâches cognitives visait à mesurer la mobilisation du contrôle inhibiteur dans différentes conditions afin de mieux de le caractériser, la mémoire de travail était tout de même sollicitée par les tâches. Il se peut que l'implication plus importante de la mémoire de travail ait transparu dans les résultats des conditions 3 et 4 (C ↑).

En ce qui concerne les conditions 1 (F ↓ C ↓) et 2 (F ↑ C ↓), aucune différence significative n'est observée en cible. Quel que soit le type d'amorce, la performance et les temps de réponse observés sont statistiquement les mêmes. Cette absence d'effet d'amorçage négatif, qui peut paraître surprenante au regard de l'importante littérature portant sur le contrôle inhibiteur et l'apprentissage des sciences (pour une revue, voir Mason et Zaccoletti, 2021), peut être interprétée de différentes manières. Une conclusion hâtive serait de dire que les élèves n'ont pas besoin du contrôle inhibiteur pour résister à leurs conceptions intuitives et pour mobiliser les concepts scientifiques requis, soit le magnétisme et les états solide et liquide de la matière, puisque leur niveau de *complexité* est faible. Toutefois, il convient de rappeler que l'effet d'interférence causé par l'amorce n'était pas le même pour ces deux conditions. Bien que les résultats en cible soient identiques, il semble plus approprié de les discuter séparément en fonction des effets d'interférence détectés en amorce.

Des effets d'interférence typiques (temps de réponse plus élevés et performance plus faible) étaient observés en amorce pour la condition 1 (F ↓ C ↓), mais ceux-ci n'ont pas eu d'incidence sur le traitement de la cible. Cela paraît d'autant plus surprenant que deux effets d'interférence étaient présents. Les temps de réponse plus longs et la performance plus faible suggèrent que les amorces incongruentes avaient perturbé le raisonnement des élèves. Ainsi, il aurait été attendu qu'un effet d'amorçage négatif soit détecté en cible, conformément à ce qui est habituellement observé dans les études similaires (par ex. Brault Foisy *et al.*, 2021). Une piste d'explication plausible réside dans les niveaux des variables *familiarité* et *complexité*, qui étaient tous deux faibles pour cette condition. Ainsi, bien que le concept à mobiliser soit peu complexe, la faible performance aux items incongruents peut s'expliquer par le faible

niveau de *familiarité* de la conception intuitive. Comme celle-ci est peu familière, les élèves ont besoin de plus de temps de réflexion lorsqu'ils analysent l'item incongruent. En fait, les temps de réponse plus longs observés aux items incongruents en amorce suggèrent que les élèves détectent l'incongruité et que, par hypothèse, leur cortex cingulaire antérieur s'active (Botvinick, 2007; Bush *et al.*, 2000). Cependant, comme tous n'ont pas les connaissances nécessaires pour inhiber leur conception intuitive et mobiliser le concept requis, cela se traduit par une performance assez faible aux items incongruents ($M = 0,66$; $ET = 0,23$). Ainsi, comme les élèves inhibent peu ou pas, il n'y a pas d'effet d'amorçage négatif sur la cible. Cette interprétation s'avère cohérente avec certaines études en IRMf qui ont montré qu'au même titre que les élèves qui répondent correctement, il peut arriver que des élèves qui se trompent activent tout de même leur cortex cingulaire antérieur; signe qu'ils détectent le conflit, mais ne parviennent pas forcément à inhiber ensuite (pour un ex. en sciences, voir Allaire-Duquette, 2018; pour d'autres ex. voir De Neys *et al.*, 2008; Vartanian *et al.*, 2018). Les résultats pour cette condition peuvent aussi être interprétés à la lumière du modèle de Potvin (2013) qui insiste sur l'importance d'avoir « un plan B », c'est-à-dire une option conceptuelle sur laquelle l'élève peut se rabattre lorsqu'un conflit est détecté. Comme les résultats suggèrent que les élèves ne disposaient pas de conception alternative à leur conception intuitive, la faible performance en amorce qui ne se répercute pas sur le traitement de la cible serait associée à un manque de connaissances plutôt qu'à un manque de contrôle inhibiteur. Ainsi, ce résultat ne veut pas dire que la mobilisation du contrôle inhibiteur n'est pas nécessaire pour surmonter la conception intuitive en jeu. Afin de pouvoir mesurer cela, il faudrait que les élèves qui complètent la tâche connaissent minimalement le nom des métaux qui sont attirés par les aimants. En outre, les résultats obtenus pour cette condition soulignent l'importance de rendre les concepts scientifiques disponibles le plus tôt possible (Potvin, 2013).

En ce qui concerne la condition 2 ($F \uparrow C \downarrow$), un effet d'interférence atypique était présent en amorce : les temps de réponse étaient plus longs pour les items neutres que pour les items incongruents, tandis qu'aucune différence significativement n'était observée quant à la performance : celle-ci était très élevée pour les deux types d'amorce. Or, cet effet ne s'est pas répercuté sur la cible, que l'on considère la performance ou les temps de réponse. Ces résultats peuvent paraître surprenants au regard de l'étude de Babai et Amsterdamer (2008) considérant que la tâche utilisée pour cette condition était en partie inspirée de la leur. Ces chercheurs avaient détecté des différences pour les temps de réponse et la performance et avaient conclu que les élèves de 14-15 ans devaient surmonter les conceptions intuitives « les solides sont rigides » et « les liquides se versent » même après avoir reçu un enseignement formel des états de la matière. Ils interprétaient les résultats de leur étude comme un appui à la théorie des doubles processus,

suggérant que deux types de raisonnement distincts coexistent et peuvent se faire compétition, au même titre que les conceptions intuitives et les concepts scientifiques étudiés dans leur recherche. Toutefois, il importe de mentionner que Babai et Amsterdamer (2008) ont comparé seulement des items congruents et des items incongruents pour détecter des différences. Leur étude n'impliquait pas d'items neutres et ne reposait pas sur un paradigme d'amorçage négatif. Dans le cas de la présente étude, si les temps de réponse aux items congruents présentés en cible ($M = 706$ lorsque précédé d'une amorce neutre et $M = 710$ lorsque précédé d'une amorce incongruente) et incongruents ($M = 765$) étaient comparés entre eux, nos conclusions seraient possiblement similaires à celles de Babai et Amsterdamer (2008). En outre, l'étude de Babai et Amsterdamer (2008) a contribué à appuyer la théorie de la coexistence des conceptions et à jeter les bases des études portant sur les processus cognitifs impliqués dans le traitement des conceptions intuitives, tandis que la présente étude porte plus directement sur le contrôle inhibiteur.

Par ailleurs, une autre explication possible pour justifier l'absence d'effet d'amorçage négatif pour cette condition ($F \uparrow C \downarrow$) réside dans l'interaction entre les variables *familiarité* et *complexité*. Comme la *complexité* est faible et que les élèves sont très familiers avec la conception intuitive « tous les solides sont rigides », ils le sont peut-être aussi avec le concept scientifique en jeu. Cette *familiarité* peut avoir deux effets : faire en sorte qu'ils ont automatisé suffisamment le concept scientifique, ou encore, réduire la force de l'automatisme qui interfère, rendant la mobilisation du contrôle inhibiteur beaucoup moins nécessaire (Potvin et Cyr, 2017). Une explication alternative pourrait aussi être que le besoin de contrôle inhibiteur est devenu si faible que sa mobilisation devient pratiquement impossible à détecter avec un paradigme utilisant exclusivement des données comportementales. Le niveau élevé de *familiarité* expliquerait également pourquoi un effet d'interférence atypique sur les temps de réponse, provoqué par les items neutres, était présent en amorce. En convergence avec l'étude de Potvin et ses collaborateurs (2015) qui avaient testé différents agencements d'items en amorce et en cible, les amorces neutres « n'affectent pas les cibles autant que les amorces intuitives ou contre-intuitives » (p. 37, traduction libre). En somme, les amorces neutres n'ont pas eu d'incidence sur les cibles puisque le traitement de ces dernières impliquait peu ou pas de contrôle inhibiteur.

En outre, les résultats obtenus pour les conditions 1 ($F \downarrow C \downarrow$) et 2 ($F \uparrow C \downarrow$) mettent en lumière une perspective de recherche intéressante : les effets de la variable *familiarité* pourraient aussi être explorés au regard des concepts scientifiques, et non seulement au regard des conceptions intuitives. Un concept peu complexe et peu familier est possiblement plus difficile à mobiliser qu'un concept peu

complexe, mais très familier. Potvin et ses collègues (2015a) abondent également en ce sens : la *familiarité* et la *complexité* ont peut-être toutes deux un effet sur la capacité des élèves à mobiliser adéquatement des concepts scientifiques. La section qui suit vise à revenir plus systématiquement sur les hypothèses de recherche en lien avec les variables étudiées et en s'appuyant sur l'interprétation des résultats en cible.

5.3 Effets des variables didactiques sur la mobilisation du contrôle inhibiteur

Les hypothèses de recherche concernaient les niveaux faible et élevé des deux variables, soit les conditions 1 (F ↓ C ↓) et 4 (F ↑ C ↑). La littérature ne permettait pas de départager les effets des deux variables, c'est pourquoi il avait été décidé d'utiliser des conditions dites intermédiaires, soit les conditions 2 (F ↑ C ↓) et 3 (F ↓ C ↑), afin de contribuer à préciser l'influence de chacune des deux variables. Les résultats obtenus corroborent en partie les hypothèses de recherche.

D'abord, les résultats sont cohérents avec la réflexion à l'origine de ce projet : des variables didactiques semblent influencer la mobilisation du contrôle inhibiteur. Le fait que les effets d'interférence et d'amorçage négatif observés soient différents d'une condition à l'autre soutient ce postulat. Par contre, il importe de relever que les résultats obtenus en cible ne sont pas les mêmes quand on considère la performance ou les temps de réponse, ce qui rend la confirmation ou l'infirmité des hypothèses de recherche plus difficile. Les résultats quant à la performance tendent à confirmer la deuxième hypothèse de recherche (H₂), c'est-à-dire que les niveaux élevés des deux variables influencent l'effet d'amorçage négatif, considéré comme étant représentatif d'une plus grande mobilisation du contrôle inhibiteur. Cependant, les résultats des temps de réponse sont un peu différents puisqu'ils suggèrent que c'est plutôt la variable *complexité* qui, à son niveau élevé, est associée aux effets d'amorçage négatif observés aux conditions 3 et 4 (C ↑). Toujours en considérant les temps de réponse, une seconde interaction, cette fois entre les variables *familiarité* et *complexité*, a pour effet d'augmenter les temps de réponse en cible lorsque les niveaux des deux variables sont élevés, mais n'a pas d'incidence sur les effets d'amorçage négatif observés. Compte tenu de l'ampleur du corpus de recherches portant sur la persistance des conceptions intuitives (Brault Foisy *et al.*, 2021; Shtulman et Valcarcel, 2012; Shtulman et Harrington, 2015; Potvin et Cyr, 2017; Vaughn *et al.*, 2020; Vosniadou *et al.*, 2018), ce résultat peut paraître étonnant. En revanche, cela ne veut pas nécessairement dire que la variable *familiarité* n'a pas d'effet du tout sur le contrôle inhibiteur puisque le niveau élevé de *familiarité* contribuait à l'effet d'amorçage négatif observé quant à la performance.

Il est possible de penser que les niveaux faible et élevé de la variable *familiarité* n'étaient pas assez contrastés pour que l'effet de la *familiarité* soit détectable sur les temps de réponse. Utilisant des scores de 1 à 6, le panel de didacticiens avait octroyé des scores de 3,66 et 3,67 aux conceptions ayant un niveau de *familiarité* faible ($M_{\text{FamiliaritéFaible}} = 3,67$), tandis que les scores de celles ayant un niveau de *familiarité* élevé étaient 4,44 et 4,31 ($M_{\text{FamiliaritéÉlevée}} = 4,38$). Ainsi, un écart de 0,71 sépare les niveaux faible et élevé. À titre comparatif, l'écart entre les niveaux de *complexité* était un peu plus grand, soit de 0,91. Les niveaux faible et élevé de la variable *complexité* étaient donc un peu plus contrastés que ceux de la variable *familiarité*. À ce propos, il est certain qu'une plus grande quantité de paires de conceptions auraient pu être évaluées par le panel si cette recherche avait été menée auprès d'élèves plus âgés, ce qui aurait peut-être permis, en utilisant un éventail plus large, d'avoir des conceptions plus contrastées en termes de *familiarité* et de détecter des effets significatifs sur l'effet d'amorçage négatif.

Ainsi, contrairement aux hypothèses de recherche, c'est principalement la variable *complexité* qui semble être associée à des effets d'amorçage négatif. Le niveau de *complexité* élevé des concepts scientifiques a pour effet d'augmenter les temps de réponse en cible de façon générale, en plus d'être associé aux effets d'amorçage négatif, représentatifs de la mobilisation du contrôle inhibiteur. Un faible niveau de *complexité* semble faire en sorte que l'effet d'amorçage négatif n'est pas significatif, et ce, tant pour la performance que les temps de réponse. Comme évoqué dans la section précédente, une piste d'interprétation réside possiblement dans la charge cognitive associée aux concepts complexes qui s'ajoute à celle des conceptions variées que doit traiter et manipuler la mémoire de travail. Quant à la variable *familiarité*, celle-ci a possiblement une incidence sur la mobilisation du contrôle inhibiteur, mais les résultats sont plus difficiles à interpréter que pour la variable *complexité*. Les résultats suggèrent qu'un faible niveau de *familiarité* n'est pas associé aux effets d'amorçage négatif, que ce soit en considérant les temps de réponse ou la performance en cible. À son niveau élevé et combinée à une *complexité* élevée, il est possible que la *familiarité* influence l'effet d'amorçage négatif, mais seulement au regard de la performance.

En somme, bien qu'une partie des résultats obtenus ne corrobore pas les hypothèses émises initialement, cette recherche, qui explorait pour la première fois les effets de variables didactiques sur le contrôle inhibiteur, contribue de manière originale à l'avancement des connaissances. Les différentes contributions seront discutées dans les paragraphes qui suivent.

5.4 Contributions

Cette section met en valeur les principales retombées de cette recherche pour la communauté scientifique, ainsi que les implications pédagogiques pour l'enseignement des sciences au primaire.

5.4.1 Retombées pour la recherche

La majorité des études portant sur la mobilisation du contrôle inhibiteur en lien avec des contenus scolaires ont cherché à comparer l'amplitude de l'effet d'amorçage négatif entre différents groupes d'âge afin d'étudier le contrôle inhibiteur dans une perspective développementale. Ce qui ressort de ces études est que le besoin d'inhiber demeure parfois constant en fonction de l'âge (par ex. Ahr *et al.*, 2016; Lubin *et al.*, 2013), tandis que d'autres fois, ce n'est pas le cas (par ex. Aïte *et al.*, 2016; Borst *et al.*, 2013b; Lanoë *et al.*, 2016). Par exemple, en sciences, le besoin d'inhiber demeure stable au fil des âges pour la conception « ce qui bouge est vivant » (Brault Foisy *et al.*, en révision), mais diminue pour la conception « ce qui est gros coule davantage » (Brault Foisy *et al.*, 2021). Tout en s'inscrivant dans une perspective de continuité avec les études antérieures, l'originalité de la présente étude était de s'intéresser à la mobilisation du contrôle inhibiteur pour des contenus scientifiques variés, mais auprès d'un groupe d'élèves du même âge, afin d'étudier plus directement les effets de variables didactiques sur la mobilisation du contrôle inhibiteur, tel que mesurée par l'amplitude des effets d'amorçage négatif.

La découverte la plus intéressante qui émane de cette recherche concerne l'effet de la variable *complexité*. Un vaste corpus de recherches menées en psychologie cognitive et utilisant les temps de réponse a identifié depuis longtemps que des temps de réponse plus longs sont souvent un indicateur de la complexité du raisonnement qu'une personne effectue (Denes et Pizzamiglio, 1999; Kandel *et al.*, 2000). À cet effet, sans surprise, nos résultats sont cohérents avec ceux de recherches antérieures : quel que soit le type d'items (neutre, incongruent ou congruent), les temps de réponse des conditions ayant une *complexité* élevée (3 et 4) sont systématiquement plus longs que ceux ayant une *complexité* faible (1 et 2). Par contre, à notre connaissance, aucune étude n'a étudié l'effet de la *complexité* sur la mobilisation du contrôle inhibiteur dans le contexte d'apprentissages scientifiques au primaire. En montrant que la *complexité* a un effet sur l'amplitude de l'effet d'amorçage négatif, nos résultats suggèrent que certains contenus à apprendre sont plus difficiles que d'autres non seulement puisqu'ils nécessitent le contrôle inhibiteur, et non seulement parce qu'ils sont plus complexes, mais bien en raison d'une combinaison de ces deux éléments. Il était déjà établi que certains apprentissages sont plus difficiles parce qu'ils revêtent une charge cognitive importante, ce qui sollicite fortement la mémoire de travail (Baddeley, 1994;

Johnstone, 1991, 1997; Sweller *et al.*, 1998). D'autres apprentissages sont aussi plus difficiles parce qu'ils impliquent de surmonter des interférences causées par des automatismes, des stratégies intuitives ou des biais cognitifs, ce qui sollicite le contrôle inhibiteur (Houdé, 2014; Houdé et Borst, 2015). Les résultats obtenus suggèrent une interaction entre les deux – charge cognitive/mémoire de travail et contrôle inhibiteur. Évidemment, il convient de garder à l'esprit qu'il peut être plus difficile de distinguer les fonctions exécutives chez les jeunes enfants, possiblement parce qu'elles ne sont pas encore pleinement développées (Brydges *et al.*, 2014; Karr *et al.*, 2018; Wiebe *et al.*, 2011). Ainsi, ce lien doit être interprété avec prudence et dans le contexte de cette recherche qui a été menée auprès d'enfants de 10-12 ans. Ceci étant dit, cette découverte n'en demeure pas moins intéressante.

Un questionnement soulevé régulièrement dans les écrits concerne l'efficacité du contrôle inhibiteur chez les enfants. Les résultats d'études développementales sont partagés à savoir si c'est la maturation graduelle du cortex préfrontal (Luna, 2009) qui explique les différences d'efficacité du contrôle inhibiteur entre les enfants, les adolescents et les adultes, ou encore, si l'explication réside dans l'éducation et l'apprentissage. En utilisant un devis impliquant des mesures répétées auprès d'élèves du même âge et ayant conséquemment le même niveau de développement cérébral, nos résultats suggèrent que la maturation du cortex préfrontal n'explique pas, à elle seule, comment se mobilise le contrôle inhibiteur lorsque des élèves du primaire doivent répondre à des questions contre-intuitives en sciences. De surcroît, comme il est possible de présumer que les élèves du même âge ont reçu un enseignement équivalent des concepts scientifiques, l'éducation scientifique n'explique pas non plus, à elle seule, pourquoi certains contenus semblent plus difficiles à mobiliser que d'autres lorsque des conceptions intuitives interfèrent. Ainsi, nos résultats sont cohérents avec la réflexion à l'origine de cette recherche : certaines variables didactiques influencent la mobilisation du contrôle inhibiteur dans le contexte de l'apprentissage des sciences au primaire.

Les effets d'interaction entre la *familiarité* et la *complexité* sont un autre apport intéressant de la présente étude parce que ceux-ci sont observés constamment dans les résultats des analyses statistiques, que ce soit en amorce ou en cible. Qui plus est, les analyses de variance suggèrent que les variables interagissent différemment d'une condition à l'autre. Également, la *familiarité* et la *complexité* semblent agir différemment en fonction de la variable dépendante qui est mesurée. Cela pourrait suggérer que d'autres variables influencent possiblement le contrôle inhibiteur. La *familiarité* des concepts scientifiques a

d'ailleurs été évoquée dans la section qui précède. Cette recherche ouvre la voie à d'autres recherches portant sur les variables qui influencent le contrôle inhibiteur.

Enfin, dans une perspective plus large, les résultats obtenus sont pertinents pour le champ de recherche du changement conceptuel. En effet, les résultats constituent un appui supplémentaire en faveur des modèles du changement conceptuel soutenant que des concepts scientifiques coexistent aux côtés de conceptions intuitives auxquelles l'élève doit parfois résister (Mortimer, 1995; Ohlsson, 2009; Potvin, 2013; Solomon, 1983, 1984). De surcroît, en étudiant des conceptions intuitives variées auprès des mêmes élèves, les résultats indiquent qu'en dépit des différences individuelles, les conceptions intuitives et les concepts scientifiques sollicitent différemment le contrôle inhibiteur. Ce constat est également cohérent avec les études qui soutiennent que l'apprentissage n'est pas linéaire; une variété de stratégies et de conceptions sont en compétition les unes avec les autres (Chen et Siegler, 2000; Siegler, 1996; van der Ven *et al.*, 2012). En plus de ces retombées scientifiques, les résultats de cette recherche ont aussi des implications pour l'enseignement des sciences au primaire.

5.4.2 Implications pédagogiques

En premier lieu, les résultats de ce mémoire réitèrent l'importance d'enseigner les sciences aux enfants tôt dans leur parcours scolaire. Même en ce qui concerne les concepts qui ne sont pas complexes, les résultats de cette recherche mettent en lumière l'importance de rendre lesdits concepts suffisamment disponibles. Autrement, leur non-disponibilité peut nuire à la performance, et ultimement, à la réussite en sciences. Les enseignants du primaire ont donc un rôle de premier plan à jouer en ce sens.

Qui plus est, une attention particulière doit être portée en ce qui concerne les concepts scientifiques qui ont un niveau de *complexité* élevé et pour lesquels des conceptions intuitives interfèrent. Nos résultats suggèrent que l'apprentissage de ces contenus nécessite que l'élève mobilise son contrôle inhibiteur. De surcroît, la *complexité* élevée du concept scientifique à mobiliser semble rendre cette mobilisation du contrôle inhibiteur plus importante. Ainsi, l'enseignement de ces contenus devrait faire l'objet d'une attention soutenue de la part des enseignants. Différentes stratégies pédagogiques, qui sont expliquées ci-après, sont susceptibles de faciliter l'apprentissage de ces concepts.

D'abord, Carey (2000) met en lumière l'importance pour les enseignants d'inclure les conceptions intuitives des élèves dans leurs préoccupations pédagogiques, minimalement en informant leurs élèves de

leur existence pratiquement inévitable. Dans un même ordre d'idées, certains travaux de recherche ont mis en évidence qu'enseigner de nouveaux concepts scientifiques n'est pas suffisant en soi pour que les élèves réussissent : il faudrait parallèlement leur enseigner à inhiber leurs conceptions intuitives qui interfèrent (Brookman-Byrne *et al.*, 2018; Vosniadou *et al.*, 2018a). Nos résultats ne contribuent pas à proposer de stratégies pédagogiques à cet égard, mais appuient néanmoins les propositions mentionnées ci-dessus.

À ce propos, certains auteurs suggèrent qu'une stratégie pour faciliter la mobilisation du contrôle inhibiteur chez les enfants consisterait à les alerter de la « présence d'un piège » (Babai *et al.*, 2015). Cette stratégie pédagogique a pour principal avantage d'être relativement simple à mettre en place. Lorsque l'apprentissage d'un concept nécessite le contrôle inhibiteur, l'enseignant peut simplement alerter ses élèves en nommant explicitement la conception qui interfère et à laquelle il faut résister (Babai *et al.*, 2015). De façon similaire, certains auteurs suggèrent qu'il serait profitable d'entraîner les élèves à identifier les contextes dans lesquels il est susceptible d'y avoir des pièges (Deshaies *et al.*, 2020). Bien qu'il importe de garder à l'esprit que ces stratégies pédagogiques visant à faciliter la mobilisation du contrôle inhibiteur sont relativement récentes dans la littérature, les premiers résultats obtenus laissent entrevoir qu'elles puissent être profitables, en plus d'être applicables dans le contexte de l'apprentissage des sciences au primaire. Certains auteurs invitent néanmoins à la prudence quant à la mise en application de stratégies similaires auprès d'apprenants adultes (Jacobson *et al.*, 2022).

Puisque la *complexité* a un effet sur le contrôle inhibiteur, des interventions pédagogiques basées sur le niveau de *complexité* des concepts à apprendre seraient possiblement une autre avenue intéressante à exploiter en complément aux stratégies visant à faciliter la mobilisation du contrôle inhibiteur. Les chercheurs qui s'intéressent à la charge cognitive ont proposé par le passé différentes stratégies pédagogiques susceptibles de faciliter l'apprentissage de contenus complexes (pour une revue, voir Sweller *et al.*, 2019). L'une des propositions pertinentes de ces études est de réduire la charge cognitive imposée par les concepts complexes. Certains chercheurs suggèrent notamment que des concepts complexes devraient d'abord être appris de manière isolée. Une fois que les éléments isolés sont maîtrisés, et donc, encodés dans la mémoire à long terme, il deviendrait possible d'établir des relations entre eux plus facilement (van Merriënboer *et al.*, 2003, van Merriënboer et Sweller, 2005; 2010). Une autre suggestion consiste à soutenir de façon considérable les élèves au départ, puis à diminuer graduellement ce soutien afin que la charge cognitive exigée par le contenu à apprendre demeure toujours adéquate (van

Merriënboer *et al.*, 1992; van Merriënboer et Kirschner, 2018). Ces stratégies pédagogiques où l'élève est davantage guidé dans ses apprentissages peuvent sembler contradictoires avec l'approche inductive qui caractérise généralement les apprentissages scientifiques (Thouin, 2017). Cependant, dans le contexte d'apprentissages scientifiques qui sont complexes et qui nécessitent le contrôle inhibiteur, favoriser une maîtrise adéquate des concepts ayant un niveau élevé de *complexité* avant de lancer les élèves dans une démarche d'investigation semble plus approprié. D'ailleurs, d'autres études ont montré qu'il était favorable d'expliquer les concepts scientifiques aux élèves avant de les confronter au fait que leurs conceptions intuitives ne sont pas toujours efficaces ou suffisantes (Ganea *et al.*, 2020; Potvin *et al.*, 2015b).

Dans tous les cas, réfléchir aux pratiques professionnelles susceptibles de rendre l'enseignement des sciences au primaire fréquent et de qualité demeure une préoccupation légitime considérant que la réussite des élèves en sciences est liée à la persévérance et à la réussite éducative (OCDE, 2008). Les prochains paragraphes discuteront des principales limites de cette recherche et proposeront des pistes de recherche futures.

5.5 Limites et pistes de recherches futures

Comme cette étude s'est déroulée auprès d'élèves du primaire, les possibilités de paires de conceptions pouvant être évaluées par les didacticiens, puis utilisées pour concevoir les tâches cognitives, étaient plus limitées que si nous avions sollicité des participants adultes qui ont généralement plus de connaissances scientifiques. Conséquemment, une seule paire de conceptions correspondait à chacune des quatre conditions expérimentales, ce qui restreint la portée des résultats obtenus. Si un plus grand nombre de paires de conceptions avait pu être évalué par le panel de didacticiens, il aurait alors été envisageable d'utiliser deux paires de conceptions pour chacune des quatre conditions expérimentales. Cette répétition de la mesure aurait permis de mieux contrôler la variation liée aux items employés dans les tâches, ce qui aurait contribué à affiner notre interprétation des résultats. Autrement dit, utiliser plusieurs paires de conceptions pour chaque condition aurait fait en sorte que les différences observées auraient pu être attribuées de manière encore plus convaincante à la *familiarité* et à la *complexité*, plutôt qu'à des différences potentiellement causées par d'autres caractéristiques, telles que la discipline scientifique sollicitée par la tâche, ou encore, le manque de connaissances associé à un item en particulier. Ainsi, les résultats obtenus dans cette recherche doivent être considérés au regard de cette limite.

Il convient également de mentionner qu'un des défis importants de cette étude a été de concevoir quatre tâches cognitives de manière à ce que leur structure soit la plus similaire possible et que ce qui les distingue soit les niveaux des variables *familiarité* et *complexité*. Alors que certains chercheurs se montrent prudents en utilisant des outils de mesure déjà existants et validés par la communauté scientifique, nous avons fait le choix de nous appuyer sur l'expertise d'un panel de didacticien pour qu'ils identifient le plus objectivement possible les conceptions se situant le mieux au croisement des niveaux faibles et élevés des variables *familiarité* et *complexité*. Ce faisant, les tâches cognitives ont dû être conçues de toutes pièces puisque les choix du panel ne correspondaient pas à des contenus pour lesquels des tâches existantes auraient pu être utilisées. Ainsi, comme expliqué au chapitre 3 de ce mémoire, certains compromis ont dû être faits afin de respecter les choix de conceptions effectués par le panel de didacticiens et de concevoir les quatre tâches afin qu'elles soient le plus équivalentes possible. Malgré toutes les précautions prises, l'impureté des tâches, c'est-à-dire la présence potentielle de variables confondantes au sein des tâches, reste une limite qu'il importe de mentionner (« *task impurity* », voir Gärtner et Strobel, 2021; Niggs, 2000). Dans la même lignée, certains auteurs avancent aussi que le contrôle inhibiteur comporte plusieurs composantes (Friedman et Miyake, 2004; Niggs, 2000). Bien que les tâches de cette recherche aient été conçues pour mesurer l'inhibition cognitive, il se peut que d'autres composantes du contrôle inhibiteur, notamment l'attention sélective (Diamond, 2013), aient été sollicitées par les tâches.

Le choix d'utiliser seulement des mesures comportementales est aussi une des limites de cette recherche. Bien que le paradigme d'amorçage négatif ait fait ses preuves et soit reconnu comme rigoureux (Borst *et al.*, 2013a), il ne permet pas de mesurer directement l'activité cérébrale qui sous-tend la mobilisation du contrôle inhibiteur. Des technologies comme l'EEG (Skelling-Desmeules *et al.*, 2021; Zhu *et al.*, 2019) ou l'IRMf (Allaire-Duquette *et al.*, 2019) auraient permis de collecter des mesures cérébrales, offrant ainsi des pistes d'interprétation complémentaires afin de mieux comprendre les résultats des conditions 1 et 2 pour lesquelles aucun effet d'amorçage négatif n'a pu être observé lors des analyses. Dans cette même perspective, ces méthodes auraient pu contribuer à détecter des effets plus subtils des variables, ou encore, servir de mesure supplémentaire. Trianguler les données comportementales et cérébrales aurait pu donner une interprétation encore plus crédible aux résultats. Néanmoins, pour les raisons évoquées au chapitre 3, l'utilisation des données comportementales était pleinement adéquate pour cette recherche qui explorait pour la première fois les effets de deux variables.

Outre ces limites, les résultats de cette recherche suggèrent plusieurs pistes de recherche prometteuses. En premier lieu, dans une perspective de continuité, il serait assurément pertinent de tester les effets des mêmes variables didactiques, mais auprès d'autres groupes d'âge. Les tâches conçues pour ce mémoire pourraient facilement être réutilisées pour collecter des données auprès d'élèves du secondaire ou même auprès d'adultes. De plus, il serait envisageable que d'autres paires de conceptions puissent être utilisées pour concevoir des tâches supplémentaires destinées à des participants plus âgés afin qu'il y ait plus d'une paire de conceptions par condition. Une autre avenue intéressante serait d'utiliser plus de paires de conceptions afin d'étudier des effets plus subtils des variables, notamment en employant plus de niveaux. Par exemple, une paire de conceptions pourrait avoir un niveau de *familiarité* élevée et un niveau de *complexité* moyen.

Qui plus est, les nombreux effets d'interaction relevés suggèrent que différentes variables influencent le contrôle inhibiteur, et ce, à plusieurs étapes du processus d'inhibition, mais aussi du traitement de l'information. Également, le lien entre le contrôle inhibiteur et la *complexité* ou, plus largement, la charge cognitive, mérite d'être étudié dans le contexte d'apprentissages scientifiques différents, mais aussi dans le contexte de contenus disciplinaires différents. Enfin, les résultats mettent en évidence la pertinence de continuer à s'intéresser à la variable *familiarité*, mais en étudiant cette fois ses possibles effets sur les concepts à apprendre plutôt que sur les conceptions auxquelles l'élève doit résister.

CONCLUSION

Depuis longtemps, l'apprentissage des sciences est considéré comme difficile (Johnstone, 1991). Plusieurs chercheurs s'accordent à dire que les difficultés persistantes des élèves sont en partie causées par les conceptions intuitives variées qu'ils entretiennent à propos des phénomènes qui les entourent (Carey, 2000; diSessa, 2014; Sinatra *et al.*, 2014). Ces conceptions intuitives se développent souvent à travers les observations et les expérimentations personnelles de l'enfant (Potvin, 2018; Thouin, 2017). Bien qu'elles représentent des explications fonctionnelles et utiles dans certains contextes, elles interfèrent avec les concepts scientifiques enseignés en classe (Potvin, 2018; Thouin, 2017).

Il a longtemps été présumé que les conceptions intuitives des élèves disparaissaient après l'apprentissage des concepts scientifiques (Giordan et de Vecchi, 1987; Posner *et al.*, 1982). Toutefois, les études plus récentes indiquent qu'elles ont plutôt tendance à coexister avec les concepts scientifiques (Babai *et al.*, 2010; Shtulman et Valcarcel, 2012; Shtulman et Harrington, 2015). Grâce aux progrès technologiques, des recherches ont mis en évidence le rôle central du contrôle inhibiteur dans le raisonnement scientifique (Allaire-Duquette *et al.*, 2019, 2021; Brault Foisy *et al.*, 2015; Dunbar *et al.*, 2007; Masson *et al.*, 2014). Le contrôle inhibiteur, associé au cortex préfrontal du cerveau, permet à une personne de résister à ses pensées intuitives afin de mobiliser une pensée analytique lorsque la situation l'exige (Houdé *et al.*, 2000; Houdé et Borst, 2015). Par ailleurs, certaines recherches soulignent que la mobilisation du contrôle inhibiteur est influencée par différentes variables, notamment l'âge (Lanoë *et al.*, 2016; Lubin *et al.*, 2013). En outre, en dépit de l'âge des élèves, il semble qu'il soit plus difficile de résister à certaines conceptions intuitives qu'à d'autres, tandis que certains concepts scientifiques seraient plus difficiles à mobiliser que d'autres (Brault Foisy *et al.*, 2021; Brault Foisy *et al.*, en révision). Ces observations suggèrent que des variables didactiques, c'est-à-dire liées aux contenus d'apprentissage, peuvent influencer la mobilisation du contrôle inhibiteur.

S'inscrivant dans une perspective de continuité avec les recherches récentes portant sur le contrôle inhibiteur, l'objectif de cette recherche était d'étudier les effets de variables didactiques sur la mobilisation du contrôle inhibiteur. S'appuyant sur le modèle des trois systèmes cognitifs d'Houdé et Borst (2015), il a été choisi d'explorer les effets de variables liées au système 1 et au système 2 afin d'observer leurs effets sur le système 3. Plus spécifiquement, les effets de la *familiarité* des conceptions intuitives (système 1) et de la *complexité* des concepts scientifiques (système 2) sur la mobilisation du contrôle

inhibiteur (système 3) ont été étudiés. Pour ce faire, un panel de didacticiens des sciences a été recruté afin d'évaluer le niveau de *familiarité* et de *complexité* de paires de conceptions (Thouin, 2017), ce qui a permis d'identifier les contenus scientifiques correspondant le mieux au croisement des niveaux faible et élevé des variables *familiarité* et *complexité*. Ainsi, les contenus scientifiques retenus pour étudier les effets des variables sont relatifs au magnétisme, aux états solide et liquide de la matière, au système Terre-Lune-Soleil et à la flottabilité. À partir de ces contenus, quatre tâches cognitives informatisées ont été conçues afin de pouvoir utiliser un paradigme d'amorçage négatif (Borst *et al.*, 2013a; Tipper, 1985, 2001). Ce paradigme repose sur un agencement d'items selon deux conditions, test et contrôle, pour lesquelles seule l'amorce diffère. Une collecte de données menées dans des écoles publiques de Montréal a permis à 128 élèves du 3^e cycle du primaire de compléter les quatre tâches cognitives lors de deux visites dans leur classe.

L'analyse des temps de réponse et de la performance des élèves avait pour objectif principal de dégager des effets d'amorçage négatif, soit des temps de réponse plus longs et une performance plus faible pour la condition test, associés à la mobilisation du contrôle inhibiteur. Les analyses visaient aussi à détecter les effets des variables *familiarité* et *complexité* sur les effets d'amorçage négatif. Les résultats suggèrent que c'est principalement la variable *complexité* qui a un effet sur l'effet d'amorçage négatif. En effet, l'analyse des temps de réponse indique qu'un niveau élevé de *complexité* est associé à un effet d'amorçage négatif de plus grande amplitude, tandis qu'un faible niveau de *complexité* est associé à un effet d'amorçage négatif non significatif. Les résultats obtenus pour la performance sont différents de ceux obtenus pour les temps de réponse : ils indiquent que les niveaux élevés des deux variables ont un effet sur l'effet d'amorçage négatif.

La principale conclusion de cette recherche est que certains concepts scientifiques sont plus difficiles à mobiliser non seulement parce qu'ils nécessitent que l'élève résiste à une conception intuitive et non seulement parce qu'ils sont plus complexes, mais bien en raison d'une interaction entre ces deux éléments. Il était déjà établi que certains apprentissages sont plus difficiles parce qu'ils impliquent de surmonter des interférences causées par des automatismes, des stratégies intuitives ou des biais cognitifs, ce qui sollicite le contrôle inhibiteur (Borst, 2016; Houdé, 2014; Houdé et Borst, 2015). D'autres apprentissages sont aussi plus difficiles en raison de leur niveau élevé de *complexité*, faisant en sorte qu'ils revêtent une charge cognitive importante (Johnstone, 1991, 1997; Sweller *et al.*, 1998). Les résultats de cette recherche suggèrent qu'une interaction entre ces deux éléments – contrôle inhibiteur et charge cognitive/mémoire

de travail – est susceptible de rendre ces apprentissages encore plus difficiles. Évidemment, ce lien doit être interprété avec prudence puisque certains chercheurs avancent que les fonctions exécutives sont parfois plus difficiles à distinguer les unes des autres chez les enfants (Brydges *et al.*, 2014; Karr *et al.*, 2018; Wiebe *et al.*, 2011). Quant à la *familiarité*, les résultats obtenus ne sont pas les mêmes que l'on considère la performance ou les temps de réponse. Il est probable que cette variable influence la mobilisation du contrôle inhibiteur, mais seulement lorsque la *complexité* est élevée. Les résultats de ce mémoire ouvrent la voie à d'autres recherches portant sur les variables qui influencent le contrôle inhibiteur, tant dans le contexte d'apprentissages scientifiques que dans des contextes disciplinaires variés.

En terminant, les résultats de ce mémoire réitèrent l'importance d'enseigner les sciences aux enfants tôt dans leur parcours scolaire. Qui plus est, une attention particulière devrait être portée en ce qui concerne les concepts scientifiques qui ont un niveau de *complexité* élevé et pour lesquels des conceptions intuitives interfèrent. Des stratégies pédagogiques visant à faciliter la mobilisation du contrôle inhibiteur, telles que les alertes (Babai *et al.*, 2015; Houdé *et al.*, 2001), constituent un point de départ intéressant afin de bonifier les pratiques pédagogiques en enseignement des sciences. Des stratégies visant à réduire la charge cognitive associée à la *complexité* des concepts à apprendre (Sweller *et al.*, 2019) seraient aussi une avenue pertinente et complémentaire. Des recherches futures pourront également se pencher sur la conception et la mise à l'essai d'interventions pédagogiques novatrices susceptibles de faciliter l'apprentissage de contenus complexes qui nécessitent le contrôle inhibiteur, et ce, dans la perspective de favoriser l'apprentissage et la réussite des élèves.

ANNEXE A
MATÉRIEL DE RECRUTEMENT

Courriel type d'invitation destiné à recruter des didacticien(ne)s des sciences

Bonjour,

L'Université du Québec à Montréal réalise présentement un projet de recherche sous la direction de la professeure Lorie-Marlène Brault Foisy, en collaboration avec les professeurs Steve Masson et Patrice Potvin, du Département de didactique de l'UQÀM. Le projet a pour but de mieux comprendre les processus cognitifs qui sous-tendent l'apprentissage de certains concepts scientifiques. Les résultats de cette étude sont susceptibles d'avoir des implications intéressantes pour l'enseignement des sciences et pour notre compréhension des processus liés à l'apprentissage des sciences.

Dans le cadre de ce projet de recherche, **nous souhaitons recruter 20 didacticien(ne)s en sciences afin de participer à un processus de prise de décision de groupe**. Si vous acceptez de participer, vous devrez classer une dizaine de paires de conceptions en leur attribuant un score en fonction des deux variables d'intérêt de notre recherche, selon un processus itératif en deux tours. Au terme du premier tour, un sommaire 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 intuitives qui correspondent le mieux aux niveaux extrêmes (faible et élevé) des deux variables didactiques à l'étude (familiarité et complexité). À partir de ces conceptions, nous élaborerons des tâches destinées aux élèves du primaire, du secondaire et d'étudiants universitaires.

Concrètement, si vous acceptez de participer, vous aurez à remplir un questionnaire de type « GoogleForm » au moment qui vous convient le mieux. Le premier tour aura lieu en avril 2022 et le deuxième tour en mai 2022.

Vous trouverez un document expliquant le projet de recherche en pièce jointe. Si vous êtes intéressé(e)s à participer, veuillez simplement répondre à ce courriel. Si vous avez des questions, n'hésitez pas à entrer en contact avec nous.

Merci beaucoup de votre précieuse collaboration.

Cordialement,

Élisabeth Bélanger
Étudiante à la maîtrise en éducation à l'UQAM
Coordonnatrice du projet de recherche
belanger.elisabeth@uqam.ca

**Courriel type d'invitation destiné aux directions d'établissements
(pour recruter des élèves)**

Madame, Monsieur,

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 et pour notre compréhension des processus liés à l'apprentissage des sciences. Nous vous écrivons pour solliciter votre collaboration à cette étude.

Pour réaliser celle-ci, nous avons besoin de trouver des établissements, des enseignant(e)s et des élèves volontaires. **Accepteriez-vous de nous laisser prendre contact avec des enseignant(e)s de 5^e et 6^e année de votre école ?** Leur implication consisterait, dans un premier temps, à nous accueillir pour que nous présentions notre projet de recherche à leurs élèves, puis dans un deuxième temps, à nous permettre de faire réaliser aux élèves volontaires des tâches cognitives présentées sous forme de mini-jeux à réaliser sur une tablette électronique de type iPad. Cette séance de jeux aurait une durée maximale d'une heure. Nous aurions aussi besoin de la collaboration des enseignants pour distribuer et collecter les documents d'information ainsi que les autorisations parentales.

Je joins à ce courriel le document d'information détaillant le projet de recherche.

Si vous avez des questions, n'hésitez pas à entrer en contact avec nous.

Merci beaucoup de votre précieuse collaboration,

Élisabeth Bélanger
Étudiante à la maîtrise en éducation
Coordonnatrice du projet de recherche
belanger.elisabeth@uqam.ca

Courriel type d'invitation destiné aux enseignants

Madame, Monsieur,

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 et pour notre compréhension des processus liés à l'apprentissage des sciences. Nous vous écrivons pour solliciter votre collaboration à cette étude.

Pour réaliser celle-ci, nous avons besoin de trouver des enseignant(e)s et des élèves volontaires. **Accepteriez-vous de nous ouvrir les portes de votre classe pour venir, dans un premier temps, présenter notre projet de recherche à vos élèves, puis dans un deuxième temps, faire réaliser aux élèves volontaires de votre classe des tâches cognitives présentées sous forme de mini-jeux à réaliser sur des tablettes électroniques ?** Cette séance de mini-jeux aurait une durée maximale d'une heure. Nous aurions aussi besoin de vous pour distribuer et collecter les documents d'information ainsi que les autorisations parentales.

Si vous nous faites l'honneur d'accepter, nous pourrions décider de la meilleure façon de nous organiser de façon à déranger le moins possible votre enseignement. En guise de compensation pour votre implication dans ce projet, vous recevrez une carte-cadeau d'une valeur de 100\$ que vous pourrez utiliser pour acheter le matériel scolaire de votre choix pour votre classe. Vous trouverez un document d'information détaillant mieux le projet de recherche en pièce jointe à ce courriel.

Si vous avez des questions, n'hésitez pas à entrer en contact avec nous.

Merci beaucoup de votre précieuse collaboration,

Élisabeth Bélanger
Étudiante à la maîtrise en éducation
Coordonnatrice du projet de recherche
belanger.elisabeth@uqam.ca

**Invitation à participer à une étude sur les erreurs fréquentes et les
apprentissages difficiles en science au primaire**

Chers parents,

Votre enfant est en 5^e ou 6^e année du primaire? Nous lui proposons de participer, avec sa classe, à un projet de recherche de l'Université du Québec à Montréal.

Description du projet

- Le projet vise à mieux comprendre les processus cognitifs à l'origine des difficultés en sciences
- À terme, ce projet pourrait mener à de nouvelles pistes pour mieux enseigner les sciences à l'école

Déroulement de l'étude

- Cette étude se déroulera à l'école de votre enfant, dans sa classe et durant les heures régulières de classe
- Votre enfant aura à répondre à des questions en sciences présentées sous forme de mini-jeux sur une tablette électronique

Pour être éligible, votre enfant doit :

- Être âgé de 10 à 12 ans
- Être en 5^e ou en 6^e année du primaire
- Fréquenter une école francophone depuis au moins 2 ans

Vous êtes invités à lire et compléter le formulaire de consentement ci-joint si votre enfant souhaite participer à ce projet. Si vous avez des questions, veuillez communiquer avec nous.

Élisabeth Bélanger

Enseignante au primaire et étudiante à la maîtrise en éducation
Université du Québec à Montréal
Coordonnatrice du projet de recherche
belanger.elisabeth@uqam.ca

Lorie-Marlène Brault Foisy

Professeur responsable du projet de recherche
Université du Québec à Montréal
brault-foisy.lorie-marlene@uqam.ca
514-987-3000, poste 1907



ANNEXE B

FORMULAIRE DE CONSENTEMENT DESTINÉ AUX DIDACTIENS



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 Fois, 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 engagez 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

CIEREH 2022-4092

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 : ciereh@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

CIEREH 2022-4092

ANNEXE C

EXTRAITS DU QUESTIONNAIRE DESTINÉ AUX DIDACTIENS

Visuel du début du questionnaire :

Questions Réponses 21 Paramètres



Rubrique 1 sur 16

Formulaire d'évaluation des conceptions

Bonjour!

Nous vous remercions chaleureusement d'avoir accepté de participer à ce projet de recherche!

Dans le cadre de ce projet, vous serez invité à porter une évaluation sur huit conceptions en fonction de différents critères. Ces conceptions viendront en paires, et chaque paire portera sur un thème précis. Plus spécifiquement, ces paires seront composées d'une conception "non-scientifique", c'est-à-dire une conception fréquemment entretenue par les élèves et qui n'est pas en accord avec le consensus scientifique, ainsi que d'une conception "scientifique", soit l'explication généralement acceptée par la communauté scientifique pour le même phénomène.

Pour chacune de ces paires, votre jugement devra porter sur (A) la FAMILIARITÉ de la conception non-scientifique, ainsi que sur (B) la COMPLEXITÉ de son penchant scientifique.

Définitions des variables :

(A) FAMILIARITÉ des conceptions non-scientifiques

Certaines conceptions entretenues par les élèves sont issues de leur quotidien, de leur expérience personnelle, ou encore de leur entourage. Ils y adhèrent généralement parce qu'elles proposent des explications simples pour des phénomènes récurrents, ou encore simplement parce qu'ils n'ont aucune raison de les remettre en question. Cinq critères ont été retenus pour évaluer le niveau de familiarité de ces conceptions.

(B) COMPLEXITÉ des conceptions scientifiques

À l'inverse, plusieurs conceptions scientifiques sont difficiles à maîtriser parce que certaines de leurs caractéristiques les rendent particulièrement complexes. Une explication trop abstraite, par exemple, pourrait être délaissée par les élèves puisqu'ils seraient incapables de s'en faire une représentation intelligible ou de la relier à d'autres phénomènes plus familiers. Quatre critères ont été retenus pour évaluer le niveau de complexité de ces conceptions.

Consignes :

Comment utiliser la grille

Pour chacun des critères proposés, vous aurez à poser un jugement allant de 1 à 6. Dans tous les cas, une note de "1" indique que la conception retenue n'est pas du tout familière ou complexe selon un critère particulier (ce qui ne veut pas dire qu'elle n'est pas familière ou complexe selon d'autres critères). Une note de "6", à l'inverse, indique alors que la conception retenue est extrêmement familière ou complexe selon ce critère. Les notes de 2 à 5 peuvent alors être utilisées pour rendre une évaluation plus nuancée.

Afin de vous aider dans l'évaluation des conceptions retenues, une description des critères, ainsi que différents exemples de facteurs pouvant justifier un score élevé pour ces critères, sont proposés. Notez qu'il n'est pas requis que plusieurs facteurs s'appliquent pour justifier un score élevé: s'il n'y en a qu'un seul, mais qu'il est particulièrement important à vos yeux, n'hésitez pas à attribuer le score que vous croyez le plus approprié. Il n'est pas non plus nécessaire de se limiter à ces exemples, dans la mesure où l'esprit du critère est respecté.

Exemple d'explications pour la paire de conceptions relative à la flottabilité

Les conceptions étudiées

Voici la liste des huit conceptions qui seront étudiées dans ce projet :

1. LA FLOTTABILITÉ

Description (facultative)

(1A) conception non-scientifique: Les objets lourds coulent davantage que les objets légers

Plusieurs élèves entretiennent une conception à l'effet que les objets lourds couleront plus que les objets légers. Selon cette conception, donc, le poids (ou la masse) des objets permettrait à lui seul d'évaluer si un objet coulera ou non, ou encore de dire lequel, entre deux objets, coulera davantage.

(1B) conception scientifique: Les objets ayant une masse volumique plus élevée coulent plus que les objets ayant une masse volumique plus faible

La flottabilité d'un objet est mesurée à partir de sa masse volumique. Un objet dont la masse volumique est inférieure à celle du fluide dans lequel il est immergé flottera, tandis qu'un autre dont la masse volumique est supérieure coulera. On peut ainsi comparer la masse volumique de deux objets afin de déterminer lequel coulera davantage.

Présentation des critères contribuant à la familiarité :

FAMILIARITÉ des conceptions non-scientifiques

Les prochaines sections vous demanderont d'évaluer le niveau de FAMILIARITÉ des différentes conceptions non-scientifiques retenues.

Afin de vous aider à évaluer le niveau de familiarité, cinq (5) critères ont été sélectionnés pour orienter votre réflexion :

- 1- La quotidienneté
- 2- La prévalence socioculturelle
- 3- La familiarité sémantique
- 4- L'intuitivité
- 5- L'utilité

Chacun de ces critères est expliqué dans les sections qui suivent.

Critère 1 - Quotidienneté



Description (facultative)

Titre de l'image

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.

Par exemple :

- 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.

Exemple de menu déroulant pour évaluer un critère pour une conception :



1-A : Les objets lourds coulent davantage que les objets légers *

1. Ne s'applique pas / Je ne sais pas
2. 1 - Pas du tout quotidienne
3. 2 - Très peu quotidienne
4. 3 - Peu quotidienne
5. 4 - Modérément quotidienne
6. 5 - Très quotidienne
7. 6 - Extrêmement quotidienne

ANNEXE D

TÂCHE 1 : MAGNÉTISME

1

Bienvenue !

Cette tâche porte sur le **magnétisme**.

Il est important que tu suives bien les consignes.

5

Si tu te trompes, ne panique pas !

Les mêmes images reviennent plusieurs fois durant la tâche. Tu auras donc d'autres chances de bien répondre.

L'important est que tu restes concentré et que tu essaies de répondre **le mieux possible jusqu'à la fin** de la tâche.

2

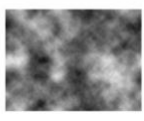
Le **magnétisme**, c'est une caractéristique qui fait en sorte que les objets sont attirés ou repoussés par un aimant.

Rappelle-toi que ce ne sont pas tous les métaux qui sont attirés par les aimants.

6

Entre la présentation des différentes images, tu verras une croix ou un écran brouillé apparaître. Tu n'as rien de particulier à faire. Attends que la prochaine image apparaisse.

+



3

Durant cette tâche, tu verras différentes images et tu devras répondre à cette question :

Est-ce attiré par l'aimant ?

Pour répondre, tu devras appuyer sur le bouton **OUI** ou sur le bouton **NON**.

7

Nous allons te montrer les différentes images que tu verras durant cette tâche.



4

Tu dois répondre le plus **rapidement** possible en essayant de **ne pas faire d'erreur**.

Pour être rapide, tu devras placer tes deux index sous les deux boutons de réponse.

OUI

NON



8

Un clou en fer



9

Une paille en plastique



13

Un trombone en fer



10

Un arc-en-ciel



14

Une bague en or



11

Une assiette en aluminium



15

Du feu



12

Un gros aimant



16

Un bâton de popsicle en bois



17

Une cuillère en fer



21

Lorsque tu es prêt, appuie sur **COMMENCER**
et place immédiatement tes index.

18

Nous allons commencer avec quelques essais
pour que tu puisses te pratiquer.

Rappelle-toi que tu dois toujours
répondre à cette question :

Est-ce attiré par l'aimant ?

22

Bravo !

Tu as terminé cette tâche.

Nous te remercions pour tes réponses.

19

Lorsque tu es prêt, appuie sur **COMMENCER**
et place immédiatement tes index.

20

Tu as terminé les essais de pratique.
Nous allons maintenant commencer la tâche.

Rappelle-toi que tu dois toujours
répondre à cette question :

Est-ce attiré par l'aimant ?

ANNEXE E

TÂCHE 2 : ÉTATS SOLIDE ET LIQUIDE

1

Bienvenue !

Cette tâche porte sur les états **solide et liquide** de la matière.

Il est important que tu suives bien les consignes.

5

Si tu te trompes, ne panique pas !

Les mêmes images reviennent plusieurs fois durant la tâche. Tu auras donc d'autres chances de bien répondre.

L'important est que tu restes concentré et que tu essaies de répondre le mieux possible jusqu'à la fin de la tâche.

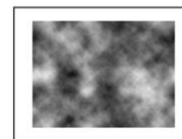
2

Les états **solide et liquide** sont des caractéristiques importantes de la matière.

Rappelle-toi que ce n'est pas seulement la rigidité d'un objet qui détermine s'il est solide ou liquide.

6

Entre la présentation des différentes images, tu verras une croix ou un écran brouillé apparaître. Tu n'as rien de particulier à faire. Attends que la prochaine image apparaisse.



3

Durant cette tâche, tu verras différentes images et tu devras répondre à cette question :

Est-ce un liquide ?

Pour répondre, tu devras appuyer sur le bouton **OUI** ou sur le bouton **NON**.

7

Nous allons te montrer les différentes images que tu verras durant cette tâche.

4

Tu dois répondre le plus rapidement possible en essayant de **ne pas faire d'erreur**. Pour être rapide, tu devras placer tes deux index sous les deux boutons de réponse.



8

Du lait



9

Du sable



13

Un morceau de bois



10

Une roche



14

Du jus d'orange



11

De la pâte à modeler



15

Une flamme



12

Un faisceau de lumière



16

Du miel



17

Du café



21

Lorsque tu es prêt, appuie sur **COMMENCER**
et place immédiatement tes index.

18

Nous allons commencer avec quelques essais pour
que tu puisses te pratiquer.

Rappelle-toi que tu dois toujours
répondre à cette question :

Est-ce un liquide ?

22

Bravo !

Tu as terminé cette tâche.

Nous te remercions pour tes réponses.

19

Lorsque tu es prêt, appuie sur **COMMENCER**
et place immédiatement tes index.

20

Tu as terminé les essais de pratique.
Nous allons maintenant commencer la tâche.

Rappelle-toi que tu dois toujours
répondre à cette question :

Est-ce un liquide ?

ANNEXE F

TÂCHE 3 : SYSTÈME TERRE-LUNE-SOLEIL

1

Bienvenue !

Cette tâche porte sur
le système Terre-Lune-Soleil.

Il est important que tu suives bien les consignes.

2

Les éléments que tu peux voir dans le ciel,
comme la Lune, le Soleil et les avions,
sont à des distances différentes de toi.

Rappelle-toi que ce n'est pas seulement
la grosseur d'un objet qui détermine
s'il est proche ou loin de toi.

3

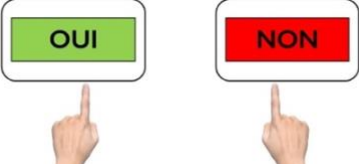
Durant cette tâche, tu verras différentes images
et tu devras répondre à cette question :

**Est-ce que ces deux éléments sont
environ à la même distance de toi ?**

Pour répondre, tu devras appuyer sur
le bouton **OUI** ou sur le bouton **NON**.

4

Tu dois répondre le plus rapidement possible en
essayant de ne pas faire d'erreur.
Pour être rapide, tu devras placer tes deux index
sous les deux boutons de réponse.



5

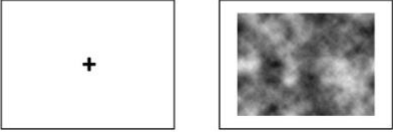
Si tu te trompes, ne panique pas !

Les mêmes images reviennent plusieurs fois durant la
tâche. Tu auras donc d'autres chances
de bien répondre.

L'important est que tu restes concentré et
que tu essaies de répondre le mieux possible
jusqu'à la fin de la tâche.

6

Entre la présentation des différentes images,
tu verras une croix ou un écran brouillé apparaître.
Tu n'as rien de particulier à faire. Attends que la
prochaine image apparaisse.



7

Nous allons te montrer les différentes images
que tu verras durant cette tâche.

8

La Lune



9

Un aigle



13

La planète Saturne



10

Un Boeing



15

Un faucon



11

Un monarque



16

Le Soleil



12

Un cumulus



17

Un morpho bleu



18

Un Airbus



22

Lorsque tu es prêt, appuie sur **COMMENCER**
et place immédiatement tes index.

19

Nous allons commencer avec quelques essais pour
que tu puisses te pratiquer.

Rappelle-toi que tu dois toujours
répondre à cette question :

**Est-ce que ces deux éléments sont
environ à la même distance de toi ?**

23

Bravo !

Tu as terminé cette tâche.

Nous te remercions pour tes réponses.

20

Lorsque tu es prêt, appuie sur **COMMENCER**
et place immédiatement tes index.

21

Tu as terminé les essais de pratique.
Nous allons maintenant commencer la tâche.

Rappelle-toi que tu dois toujours
répondre à cette question :

**Est-ce que ces deux éléments sont
environ à la même distance de toi ?**

ANNEXE G

TÂCHE 4 : FLOTTABILITÉ

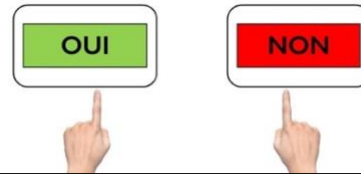
1

Bienvenue !

Cette tâche porte sur la flottabilité.
Il est important que tu suives bien les consignes.

5

Tu dois répondre le plus rapidement possible en essayant de ne pas faire d'erreur.
Pour être rapide, tu devras placer tes deux index sous les deux boutons de réponse.



2

La flottabilité, c'est une caractéristique qui fait en sorte que certains objets flottent ou coulent davantage que d'autres.

Rappelle-toi que ce n'est pas seulement la grosseur ou la masse d'un objet qui détermine s'il coule ou s'il flotte.

6

Si tu te trompes, ne panique pas !

Les mêmes images reviennent plusieurs fois durant la tâche. Tu auras donc d'autres chances de bien répondre.

L'important est que tu restes concentré et que tu essaies de répondre le mieux possible jusqu'à la fin de la tâche.

3

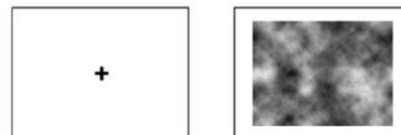
Durant cette tâche, tu verras différentes images et tu devras répondre à cette question :

Est-ce que la balle de gauche coule davantage que la balle de droite?

Pour répondre, tu devras appuyer sur le bouton OUI ou sur le bouton NON.

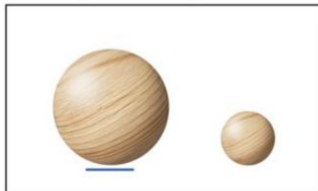
7

Entre la présentation des différentes images, tu verras une croix ou un écran brouillé apparaître. Tu n'as rien de particulier à faire. Attends que la prochaine image apparaisse.



4

Pour t'aider durant cette tâche, la balle de gauche sera toujours soulignée en bleu.



8

Nous allons te montrer les différentes images que tu verras durant cette tâche.

9



13



10



14



11



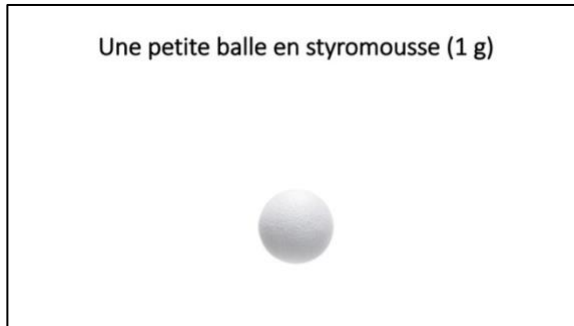
15



12



16



17

Nous allons commencer avec quelques essais pour que tu puisses te pratiquer.

Rappelle-toi que tu dois toujours répondre à cette question :

Est-ce que la balle de gauche coule davantage que la balle de droite?

21

Bravo !

Tu as terminé cette tâche.

Nous te remercions pour tes réponses.

18

Lorsque tu es prêt, appuie sur **COMMENCER** et place immédiatement tes index.

19

Tu as terminé les essais de pratique. Nous allons maintenant commencer la tâche.

Rappelle-toi que tu dois toujours répondre à cette question :

Est-ce que la balle de gauche coule davantage que la balle de droite?

20

Lorsque tu es prêt, appuie sur **COMMENCER** et place immédiatement tes index.

ANNEXE H

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



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 électronique (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.

Approbation du CIERH : 2022 - 4092

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, 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 détruit 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 I

PROTOCOLE D'EXPÉRIMENTATION

3 jours avant :

- Écrire à l'enseignant pour reconfirmer les deux rendez-vous (dates, heures, durée).
- Rappeler à l'enseignant de prévoir une occupation si certains élèves ne participent pas.
- Prévoir le chargement de la flotte de iPads et de la borne Wifi.

La veille :

- Récupérer le matériel au N-3935 : 2 valises contenant la flotte de iPads et les coquilles; le sac à dos contenant quelques chargeurs, la borne Wifi et le nettoyeur; les formulaires de consentement, les numéros de participants, du papier et des crayons pour prendre des notes.
- Vérifier que la flotte de iPads et la borne Wifi sont chargés.
- Si ce n'est pas déjà fait : activer les ID des participants de la séquence voulue sur Gorilla.
- Placer la bonne séquence de l'expérimentation sur le document GoogleDocs apparaît dans le Drive des iPads.

Le jour de l'expérimentation :

- Prévoir d'arriver au secrétariat 30 minutes avant l'heure de rendez-vous avec l'enseignant.
- **Si possible, avant d'entrer en classe : enlever tous les couvercles des iPads et ouvrir la borne Wifi (il faut tenir le bouton enfoncé quelques secondes)** pour que les iPads s'y connectent automatiquement. Placer la séquence appropriée de l'expérimentation. Cela devrait accélérer la gestion du matériel une fois arrivé en classe.

1^{re} rencontre en classe :

PRÉSENTATION DES CHERCHEUSES ET DU PROJET

- Prendre le temps de se présenter chaleureusement au groupe :
 - étudiantes-chercheuses de l'UQAM;
 - s'intéressent à comment les élèves apprennent les sciences, réfléchissent, raisonnent, etc. et aux apprentissages qui sont plus difficiles;
 - visitent environ 200 élèves de 5^e-6^e année à Montréal, dont leur classe! **Faire sentir aux élèves qu'ils jouent un rôle très important pour notre recherche en nous aidant.**
- Expliquer le déroulement du projet :
 - 2 séances en classe d'environ 30-45 minutes;
 - 4 petites activités de sciences sur des iPads;
 - les activités portent sur des contenus scientifiques que tu connais;
 - l'iPad enregistre tes réponses et à quelle vitesse tu réponds;
 - ce n'est pas évalué;
 - ta participation est libre et volontaire;
 - tes réponses sont confidentielles;
 - on souhaite que le projet nous permette de mieux comprendre comment les élèves de 10-12 ans réfléchissent, raisonnent, apprennent les sciences, etc.
- Confirmer avec le groupe que cela leur convient. Leur préciser qu'aujourd'hui, pour la 1^{re} séance, nous ferons 2 activités de sciences.
- Demander s'il y a des questions et prendre le temps d'y répondre.

DISTRIBUTION DU MATÉRIEL

- Si ce n'est pas déjà fait : ouvrir la borne Wifi pour que les iPads s'y connectent automatiquement.
- **Brancher la borne Wifi si possible.**
- Aviser les élèves qu'on va distribuer les iPads, les coquilles et les numéros de participant. **Leur demander d'attendre avant de manipuler le tout** (en insistant).
- Retirer les couvercles des iPads et les déposer à plat au centre des pupitres. Les coquilles peuvent être mises sur le coin droit des pupitres et le numéro de participant sur le coin gauche.
- Demander aux élèves d'ouvrir les iPads.
- Écrire le code pour déverrouiller les iPads au tableau (123456) et leur demander de l'entrer sur l'iPad.
- Demander aux élèves de cliquer sur l'icône Drive (en haut à gauche de l'écran).
- Demander aux élèves de cliquer sur le lien correspondant à la séquence de l'expérimentation allouée à leur groupe, par ex. : Classe de Mme Myriam – <http://gorillanaganoA.blablaba>
- S'assurer que les élèves ne débutent rien. Leur dire clairement d'attendre notre signal pour appuyer sur les boutons.
- Confirmer que tous les élèves voient bien ce qui s'affiche sur leur iPad : « est-ce que tout le monde voit bien sur son iPad ? » Au besoin, éteindre les lumières de la classe et/ou fermer un rideau. Les reflets de lumière peuvent être vraiment gênants.
- Demander aux élèves d'inscrire le numéro de participant qu'on leur a remis, par ex. : PA17 (deux lettres majuscules et deux chiffres). Cela permet à l'expérimentation de s'ouvrir. Cela peut prendre quelques secondes.
- Entrer dans l'expérimentation et guider les élèves pour qu'ils remplissent le questionnaire avec les données sociodémographiques :
 - leur niveau scolaire;
 - leur date de naissance;
 - et leur sexe.
- Observer qu'il n'y a rien qui dérange les élèves : bruits dans le corridor ou dehors, cheveux longs, besoin de se moucher, ongles qui dérangent, etc. Au besoin, fermer la porte ou les fenêtres, etc.
- Une fois le questionnaire terminé, la **première tâche** s'ouvrira.

TÂCHES

- Dire aux élèves que vous allez lire toutes les consignes avec eux. Il est important qu'ils suivent bien les consignes et qu'ils attendent toujours le signal pour appuyer sur le bouton « Suivant ».
- Lire la première diapo et **s'assurer que les élèves comprennent bien sur quoi portera la tâche. Au besoin, expliquer les mots de vocabulaire qui pourraient être moins bien compris (tout en évitant de donner davantage d'explications scientifiques aux élèves)**. Demander aux élèves d'appuyer sur le bouton « Suivant ».
- Lire les diapos suivantes, toujours en s'assurant que les élèves comprennent les consignes. Demander aux élèves d'appuyer sur le bouton « Suivant ».
- Après la diapo 7, les diapos qui suivent montrent les items aux élèves. Demander aux élèves d'appuyer sur le bouton « Suivant » après chaque stimulus.
- Lire les diapos 8 et 9. Demander aux élèves d'appuyer sur le bouton « Commencer ». Leur dire qu'après les 5 essais de pratique, ils devront attendre avant de commencer la tâche pour vrai.
- Les élèves complètent les 5 essais de pratique. Observer s'ils semblent comprendre le mode de réponse.

- Ici aussi, confirmer qu'ils sont capables de bien appuyer sur les boutons et qu'aucun distracteur ne les dérange, par ex. : reflets de lumière sur l'iPad, ongles trop longs, cheveux longs détachés, etc.
- Dire aux élèves que lorsqu'ils feront la tâche, ils doivent :
 - se concentrer durant 5-6 minutes;
 - répondre rapidement, tout en faisant le moins d'erreurs possible;
 - et être silencieux jusqu'à ce que tout le monde ait terminé.
 (Leur faire sentir que ça commence pour vrai et que **leur rôle est important!**)
- Dire que les adultes feront la même chose; ils seront silencieux, ils vont observer, mais en se déplaçant le moins possible. À partir de ce moment, une auxiliaire reste devant la classe et l'autre se place derrière pour observer. Préciser aux élèves qu'en cas de problème technique, ils peuvent lever la main en restant silencieux.
- Rappeler aux élèves qu'avec les coquilles, ils ne nous entendront pas beaucoup, mais quand ils verront notre pouce levé 👍, ils pourront appuyer sur « Commencer ».
- Leur demander de mettre les coquilles en silence.
- Quand ils ont tous les coquilles et sont en silence, leur faire un signe de pouce levé.
- Durant la tâche, observer et noter toutes anomalies, par ex. : élève distrait, élève qui ne semblent pas comprendre la tâche, élève ou événement perturbateur, etc.
- Quand tout le monde a terminé la tâche, leur faire signe d'enlever les coquilles.
- Les féliciter.
- Leur demander comment cela s'est passé. Prendre quelques minutes pour discuter avec eux avant de passer à la tâche suivante pour leur donner un petit moment de repos.
- Leur demander d'appuyer sur « Terminer ». Cela fera apparaître la Diapo 1 des consignes de la deuxième tâche.
- **Répéter les mêmes étapes pour la deuxième tâche de sciences.**
- À la fin de la deuxième tâche, remercier et féliciter les élèves. Leur demander comment cela s'est passé. Prendre quelques minutes pour discuter avec eux.
- Leur demander d'appuyer sur « Terminer », mais de ne pas fermer l'iPad. **Il est essentiel que le « delay node » apparaisse avant le fermer l'expérimentation.** Les deux auxiliaires doivent circuler et vérifier sur tous les iPads.

RANGEMENT ET CONCLUSION

- Leur demander de fermer la page internet en appuyant sur le X.
- Leur demander d'appuyer sur le bouton qui éteint l'écran de l'iPad.
- Leur demander de replier les coquilles pour les refermer.
- Procéder au ramassage du matériel (iPads, coquilles et numéros de participant) et remettre les couvercles sur les iPads en les récupérant si la journée est terminée. Sinon, les garder sans couvercles pour le deuxième groupe.
- Compter les iPads/couvercles et les coquilles afin de s'assurer d'avoir bel et bien récupéré tout le matériel.
- Éteindre la borne Wifi et la ranger dans le sac à dos.
- Annoncer aux élèves qu'on les reverra dans quelques jours.
- Remercier les élèves et l'enseignant.e.
- Quitter la classe avec le matériel.

SUITE À LA RENCONTRE

- Nettoyer les écrans des iPads avec le nettoyant prévu à cet effet et un chiffon doux pour enlever les traces de doigts.
- Charger les iPads et la borne Wifi en vue de la prochaine utilisation.

2^e rencontre en classe :

PRÉSENTATION DES CHERCHEUSES ET DU PROJET

- Saluer les élèves et prendre le temps de les remettre dans le contexte du projet :
 - C'est notre 2^e et dernière rencontre;
 - Aujourd'hui, nous ferons 2 petites activités de sciences sur des iPads;
 - Les activités portent sur des contenus scientifiques que tu connais;
 - Le iPad enregistre tes réponses et à quelle vitesse tu réponds;
 - Ce n'est pas évalué;
 - Ta participation est libre et volontaire;
 - Tes réponses sont confidentielles;
 - On souhaite que le projet nous permette de mieux comprendre comment les élèves de 10-12 ans réfléchissent, raisonnent, apprennent les sciences, etc. - **Faire sentir aux élèves qu'ils jouent un rôle très important pour notre recherche en nous aidant !**
- Confirmer avec le groupe que cela leur convient.
- Demander s'il y a des questions et prendre le temps d'y répondre.

DISTRIBUTION DU MATÉRIEL

- Si ce n'est pas déjà fait : ouvrir la borne Wifi pour que les iPads s'y connectent automatiquement.
- **Brancher la borne Wifi si possible.**
- Aviser les élèves qu'on va distribuer les iPads, les coquilles et les numéros de participant. **Leur demander d'attendre avant de manipuler le tout** (en insistant).
- Retirer les couvercles des iPads et les déposer à plat au centre des pupitres. Les coquilles peuvent être mises sur le coin droit des pupitres et le numéro sur le coin gauche.
- Demander aux élèves d'ouvrir les iPads.
- Écrire le code pour déverrouiller les iPads au tableau (123456) et leur demander de l'entrer sur l'iPad.
- Demander aux élèves de cliquer sur l'icône Drive (en haut à gauche de l'écran).
- Demander aux élèves de cliquer sur le lien correspondant à la séquence de l'expérimentation allouée à leur groupe, par ex. : Classe de Mme Myriam – <http://gorillanaganoA.blablaba>
- Demander aux élèves d'inscrire le numéro de participant qu'on leur a remis, par ex. : A17 (deux lettres majuscules et deux chiffres). **Il est important que les élèves entrent de manière identique leur numéro de participant. Cela permet à l'expérimentation de s'ouvrir suite au « delay node ».** Cela peut prendre quelques secondes.
- La **troisième tâche** s'ouvrira.
- S'assurer que les élèves ne débutent rien. Leur dire clairement d'attendre notre signal pour appuyer sur les boutons.

TÂCHES

- Leur préciser que vous allez lire toutes les consignes avec eux. Il est important qu'ils suivent bien les consignes et qu'ils attendent toujours le signal pour appuyer sur le bouton « Suivant ».
- Lire la première diapo et **s'assurer que les élèves comprennent bien sur quoi portera la tâche. Au besoin, expliquer les mots de vocabulaire qui pourraient être moins bien compris (tout en**

- évitant de donner davantage d'explications scientifiques aux élèves).** Demander aux élèves d'appuyer sur le bouton « Suivant ».
- Lire les diapos suivantes, toujours en s'assurant que les élèves comprennent les consignes. Demander aux élèves d'appuyer sur le bouton « Suivant ».
 - Après la diapo 7, les diapos qui suivent montrent les items aux élèves. Demander aux élèves d'appuyer sur le bouton « Suivant » après chaque stimulus.
 - Lire les diapos 8 et 9. Demander aux élèves d'appuyer sur le bouton « Commencer ». Leur dire qu'après les 5 essais de pratique, ils devront attendre avant de commencer la tâche pour vrai.
 - Les élèves complètent les 5 essais de pratique. Observer s'ils semblent comprendre le mode de réponse.
 - Ici aussi, confirmer qu'ils sont capables de bien appuyer sur les boutons et qu'aucun distracteur ne les dérange, par ex. : reflets de lumière sur l'iPad, ongles trop longs, cheveux longs détachés, etc.
 - Dire aux élèves que lorsqu'ils feront la tâche, ils doivent :
 - se concentrer durant 5-6 minutes;
 - répondre rapidement, tout en faisant le moins d'erreurs possible;
 - et être silencieux jusqu'à ce que tout le monde ait terminé.
 (Leur faire sentir que ça commence pour vrai et que **leur rôle est important!**)
 - Dire que les adultes feront la même chose; ils seront silencieux, ils vont observer, mais en se déplaçant le moins possible. À partir de ce moment, une auxiliaire reste devant la classe et l'autre se place derrière pour observer. Préciser aux élèves qu'en cas de problème technique, ils peuvent lever la main en restant silencieux.
 - Rappeler aux élèves qu'avec les coquilles, ils ne nous entendront pas beaucoup, mais quand ils verront notre pouce levé 👍, ils pourront appuyer sur « Commencer ».
 - Leur demander de mettre les coquilles en silence.
 - Quand ils ont tous les coquilles et sont en silence, leur faire un signe de pouce levé.
 - Durant la tâche, observer et noter toutes anomalies, par ex. : élève distrait, élève qui ne semble pas comprendre la tâche, élève ou événement perturbateur, etc.
 - Quand tout le monde a terminé la tâche, leur faire signe d'enlever les coquilles.
 - Les féliciter.
 - Leur demander comment cela s'est passé. Prendre quelques minutes pour discuter avec eux avant de passer à la tâche suivante pour leur donner un petit moment de repos.
 - Leur demander d'appuyer sur « Terminer ». Cela fera apparaître la Diapo 1 des consignes de la quatrième tâche.
 - **Répéter les mêmes étapes pour la quatrième tâche.**
 - À la fin de la dernière tâche, remercier et féliciter les élèves. Leur demander comment cela s'est passé. Prendre quelques minutes pour discuter avec eux.
 - Leur demander d'appuyer sur « Terminer ». **Gorilla fera apparaître un petit message « finish »; il est essentiel de voir ce message avant de fermer l'expérimentation.** Les deux auxiliaires doivent circuler et vérifier sur tous les iPads.

RANGEMENT ET CONCLUSION

- Leur demander de fermer la page internet en appuyant sur le X.
- Leur demander d'appuyer sur le bouton qui éteint l'écran de l'iPad.
- Leur demander de replier les coquilles pour les refermer.

- Procéder au ramassage du matériel (iPads, coquilles et numéros de participant) et remettre les couvercles sur les iPads en les récupérant si la journée est terminée. Sinon, les garder sans couvercles pour le deuxième groupe.
- Compter les iPads et les coquilles afin de s'assurer d'avoir bel et bien récupéré tout le matériel.
- Éteindre la borne Wifi et la ranger dans le sac à dos.
- Remercier les élèves et l'enseignant pour l'ensemble de leur participation au projet.
- Remettre la carte-cadeau à l'enseignant.
- Quitter la classe.

SUITE À LA RENCONTRE

- Nettoyer les écrans des iPads avec le nettoyeur prévu à cet effet et un chiffon doux pour enlever les traces de doigts.
- Rapporter tout le matériel à l'UQAM et charger les iPads et la borne Wifi en vue de la prochaine utilisation.

RÉFÉRENCES

- Abimbola, I. O. (1988). The problem of terminology in the study of student conceptions in science. *Science Education*, 72(2), 175-184. <https://doi.org/10.1002/sce.3730720206>
- Ahmed, S. F., Tang, S., Waters, N. E. et Davis-Kean, P. (2019). Executive function and academic achievement: Longitudinal relations from early childhood to adolescence. *Journal of Educational Psychology*, 111(3), 446-458. <https://doi.org/10.1037/edu0000296>
- 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, 157-165. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2015.12.009>
- Ahr, E., Houdé, O. et Borst, G. (2017). Predominance of lateral over vertical mirror errors in reading: A case for neuronal recycling and inhibition. *Brain and Cognition*, 116, 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.bandc.2017.03.005>
- Aïte, A., Berthoz, A., Vidal, J., Roëll, M., Zaoui, M., Houdé, O. et Borst, G. (2016). Taking a third-person perspective requires inhibitory control: Evidence from a developmental negative priming study. *Child Development*, 87(6), 1825-1840. <https://doi.org/10.1111/cdev.12558>
- Allaire-Duquette, G. (2018). Relation entre le contrôle inhibiteur et les difficultés des élèves à mobiliser les conceptions scientifiques. [Thèse de doctorat, Université du Québec à Montréal]. Archipel. <https://archipel.uqam.ca/11466/>
- Allaire-Duquette, G., Bélanger, M., Grabner, R. H., Koschutnig, K. et Masson, S. (2019). Individual differences in science competence among students are associated with ventrolateral prefrontal cortex activation. *Journal of Neuroscience Research*, 97(9), 1163-1178. <https://doi.org/10.1002/jnr.24435>
- Allaire-Duquette, G., Brault Fois, 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. <https://doi.org/10.1038/s41539-021-00091-x>
- Allen, M. (2019). *Misconceptions in Primary Science 3*. McGraw-Hill Education.
- Alter, A. L. et Oppenheimer, D. M. (2006). Predicting short-term stock fluctuations by using processing fluency. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 103(24), 9369-9372. <https://doi.org/10.1073/pnas.0601071103>
- Anderhag, P., Wickman, P. O., Bergqvist, K., Jakobson, B., Hamza, K. M. et Säljö, R. (2016). Why do secondary school students lose their interest in science? Or does it never emerge? A possible and overlooked explanation. *Science Education*, 100(5), 791-813. <https://doi.org/10.1002/sce.21231>
- Ansari, D., De Smedt, B. et Grabner, R. H. (2011). Neuroeducation – A critical overview of an emerging field. *Neuroethics*, 5(2), 105-117. <https://doi.org/10.1007/s12152-011-9119-3>

- Anwyl-Irvine, A. L., Massonnié, J., Flitton, A., Kirkham, N. et Evershed, J. K. (2020a). Gorilla in our midst: An online behavioral experiment builder. *Behavior Research Methods*, 52(1), 388-407. <https://doi.org/10.3758/s13428-019-01237-x>
- Anwyl-Irvine, A., Dalmaijer, E., Hodges, N. et Evershed, J. (2020b). Online timing accuracy and precision: A comparison of platforms, browsers, and participant's devices. Preprint.
- Aoki, T., Francis, P. R. et Kinoshita, H. (2003). Differences in the abilities of individual fingers during the performance of fast, repetitive tapping movements. *Experimental Brain Research*, 152(2), 270-280. <https://doi.org/10.1007/s00221-003-1552-z>
- Aron, A. R., Robbins, T. W. et Poldrack, R. A. (2004). Inhibition and the right inferior frontal cortex. *Trends in Cognitive Sciences*, 8(4), 170-177. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2004.02.010>
- Astolfi, J.-P., Peterfalvi, B. et Verin, A. (2006). *Comment les enfants apprennent les sciences?* Retz.
- Avgerinou, V. A. et Tolmie, A. (2020). Inhibition and cognitive load in fractions and decimals. *British Journal of Educational Psychology*, 90, 240-256. <https://doi.org/10.1111/bjep.12321>
- 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. <https://doi.org/10.1007/s10956-008-9122-6>
- Babai, R., Levyadun, T., Stavy, R. et Tirosh, D. (2006). Intuitive rules in science and mathematics: A reaction time study. *International Journal of Mathematical Education in Science and Technology*, 37(8), 913-924. <https://doi.org/10.1080/00207390600794958>
- 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. <https://doi.org/10.1007/s10956-009-9174-2>
- Babai, R., Shalev, E. et Stavy, R. (2015). A warning intervention improves students' ability to overcome intuitive interference. *ZDM Mathematics Education*, 47(5), 735-745. <http://doi.org/10.1007/s11858-015-0670-y>
- Babai, R., Younis, N. et Stavy, R. (2014). Involvement of inhibitory control mechanisms in overcoming intuitive interference. *Neuroeducation*, 3(1), 19. <https://doi.org/10.24046/neuroed.20140301.1>
- Baddeley, A. (1994). The magical number seven: Still magic after all these years? *Psychological Review*, 101(2), 353-356. <https://doi.org/10.1037/0033-295X.101.2.353>
- Baggetta, P. et Alexander, P. A. (2016). Conceptualization and operationalization of executive function. *Mind, Brain, and Education*, 10(1), 10-33. <https://doi.org/10.1111/mbe.12100>
- Bago, B. et De Neys, W. (2017). Fast logic?: Examining the time course assumption of dual process theory. *Cognition*, 158, 90-109. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2016.10.014>
- Bago, B. et De Neys, W. (2019). The Smart System 1: Evidence for the intuitive nature of correct responding on the bat-and-ball problem. *Thinking & Reasoning*, 25(3), 257-299.

<https://doi.org/10.1080/13546783.2018.1507949>

- Bahar, M. et Polat, M. (2007). The science topics perceived difficult by pupils at primary 6-8 classes: Diagnosing the problems and remedy suggestions. *Educational Sciences: Theory & Practice*, 7(3), 1113-1130.
- Barnett, M., Wagner, H., Gatling, A., Anderson, J., Houle, M. et Kafka, A. (2006). The impact of science fiction film on student understanding of science. *Journal of Science Education and Technology*, 15(2), 179-191. <https://doi.org/10.1007/s10956-006-9001-y>
- Baum, G. L., Ciric, R., Roalf, D. R., Betzel, R. F., Moore, T. M., Shinohara, R. T., Kahn, A. E., Vandekar, S. N., Rupert, P. E., Quarmley, M., Cook, P. A., Elliott, M. A., Ruparel, K., Gur, R. E., Gur, R. C., Bassett, D. S. et Satterthwaite, T. D. (2017). Modular segregation of structural brain networks supports the development of executive function in youth. *Current Biology*, 27(11), 1561-1572.e8. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2017.04.051>
- Béna, J., Carreras, O. et Terrier, P. (2019). L'effet de vérité induit par la répétition : revue critique de l'hypothèse de *familiarité*. *L'Année psychologique*, 119(3), 397-425. <https://doi.org/10.3917/anpsy1.193.0397>
- Best, J. R. et Miller, P. H. (2010). A developmental perspective on executive function. *Child Development*, 81(6), 1641-1660. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8624.2010.01499.x>
- Bloom B. S. (1956). *Taxonomy of educational objectives*. Longman Green and Co Ltd.
- Borst, G. (2016). Raisonement et apprentissages des sciences : résistance cognitive, heuristiques et conceptions naïves. *Administration Education*, 152(4), 25-31.
- Borst, G., Ahr, E., Roëll, 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. <https://doi.org/10.3758/s13423-014-0663-9>
- Borst, G., Moutier, S. et Houdé, O. (2013a). Negative priming in logicomathematical reasoning. In W. De Neys et M. Osman (éd.), *New Approaches in Reasoning Research* (p. 34-50). Psychology Press.
- Borst, G., Poirel, N., Pineau, A., Cassotti, M. et Houdé, O. (2013b). Inhibitory control efficiency in a Piaget-like class-inclusion task in school-age children and adults: A developmental negative priming study. *Developmental Psychology*, 49(7), 1366–1374. <https://doi.org/10.1037/a0029622>
- Botvinick, M. M. (2007). Conflict monitoring and decision making: Reconciling two perspectives on anterior cingulate function. *Cognitive, Affective, & Behavioral Neuroscience*, 7(4), 356-366. <https://doi.org/10.3758/CABN.7.4.356>
- Botvinick, M. M., Braver, T. S., Barch, D. M., Carter, C. S. et Cohen, J. D. (2001). Conflict monitoring and cognitive control. *Psychological Review*, 108(3), 624-652. <https://doi.org/10.1037/0033-295X.108.3.624>

- Botvinick, M. M., Nystrom, L. E., Fissell, K., Carter, C. S. et Cohen, J. D. (1999). Conflict monitoring versus selection-for-action in anterior cingulate cortex. *Nature*, 402(6758), 179-181. <https://doi.org/10.1038/46035>
- Bower, C. A. (2017). *Facilitating children's understanding of astronomy through a spatial perspective-taking intervention*. [Thèse de doctorat, Pennsylvania State University].
- Brault Foisy, L. M., Ahr, E., Blanchette Sarrasin, J., Potvin, P., Houdé, O., Masson, S. et Borst, G. (en révision). It's alive! Grasping the scientific principles of life is grounded on the inhibition of the "moving things are alive" misconception at all ages. *Learning and Instruction*.
- Brault Foisy, L.-M., Ahr, E., Blanchette Sarrasin, 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, 105-155. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2021.105155>
- Brault Foisy, L.-M., Ahr, E., Masson, S., Houdé, O. et Borst, G. (2017). Is inhibitory control involved in discriminating pseudowords that contain the reversible letters b and d? *Journal of Experimental Child Psychology*, 162, 259-267. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2017.05.011>
- Brault Foisy, L.-M., 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. <https://doi.org/10.1016/j.tine.2015.03.001>
- Brault Foisy L.-M., Riopel, M. et Mevel, K. (2017). L'utilisation de l'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle : les prétraitements et l'analyse des données. Dans S. Masson et G. Borst (dir.), *Méthodes de recherche en neuroéducation* (p. 61-127). Presses de l'Université du Québec.
- Brisson, G., Moffet, J.-D., Harvey, M.-F., Batiotila, N. (2013). *L'enseignement de la science et de la technologie au primaire et au premier cycle du secondaire: avis à la ministre de l'Éducation, du loisir et du sport*. Conseil supérieur de l'éducation.
- Brookman-Byrne, A., Mareschal, D., Tolmie, A. K. et Dumontheil, I. (2018). Inhibitory control and counterintuitive science and maths reasoning in adolescence. *PLOS ONE*, 13(6), e0198973. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0198973>
- Brown, T. E. et Landgraf, J. M. (2010). Improvements in executive function correlate with enhanced performance and functioning and health-related quality of life: Evidence from 2 large, double-blind, randomized, placebo-controlled trials in ADHD. *Postgraduate Medicine*, 122(5), 42-51. <https://doi.org/10.3810/pgm.2010.09.2200>
- Bruyère, M.H. et Potvin, P. (2014). Intervenir pour favoriser l'intérêt des filles pour les sciences. *Réseau d'information pour la réussite éducative (RIRE)*. http://rire.ctreq.qc.ca/2014/09/filles_sciences/
- Brydges, C. R., Fox, A. M., Reid, C. L. et Anderson, M. (2014). The differentiation of executive functions in middle and late childhood: A longitudinal latent-variable analysis. *Intelligence*, 47, 34-43. <https://doi.org/10.1016/j.intell.2014.08.010>
- Buchsbaum, B. R., Greer, S., Chang, W.-L. et Berman, K. F. (2005). Meta-analysis of neuroimaging studies of the Wisconsin Card-Sorting task and component processes. *Human Brain Mapping*, 25(1),

- 35-45. <https://doi.org/10.1002/hbm.20128>
- Bull, R. et Lee, K. (2014). Executive functioning and mathematics achievement. *Child Development Perspectives*, 8(1), 36-41. <https://doi.org/10.1111/cdep.12059>
- Bush, G., Luu, P. et Posner, M. I. (2000). Cognitive and emotional influences in anterior cingulate cortex. *Trends in Cognitive Sciences*, 4(6), 215-222. [https://doi.org/10.1016/S1364-6613\(00\)01483-2](https://doi.org/10.1016/S1364-6613(00)01483-2)
- Caravita, S. et Halldén, O. (1994). Re-framing the problem of conceptual change. *Learning and Instruction*, 4(1), 89-111. [https://doi.org/10.1016/0959-4752\(94\)90020-5](https://doi.org/10.1016/0959-4752(94)90020-5)
- Carey, S. (1985). *Conceptual Change in Childhood*. A Bradford Book.
- Carey, S. (2000). Science education as conceptual change. *Journal of Applied Developmental Psychology*, 21(1), 13-19. [https://doi.org/10.1016/S0193-3973\(99\)00046-5](https://doi.org/10.1016/S0193-3973(99)00046-5)
- Casey, B. J., Tottenham, N., Liston, C. et Durston, S. (2005). Imaging the developing brain: what have we learned about cognitive development? *Trends in Cognitive Sciences*, 9(3), 104-110. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2005.01.011>
- Cassels, J. et Johnstone, A. H. (1985). Words that matter in science: A report of a research exercise. *Royal Society of Chemistry*.
- Cassotti, M., Agogué, M., Camarda, A., Houdé, O. et Borst, G. (2016). Inhibitory control as a core process of creative problem solving and idea generation from childhood to adulthood. *New Directions for Child and Adolescent Development*, 151, 61-72. <https://doi.org/10.1002/cad.20153>
- Caulfield, T. (2020). *Does debunking work? Correcting COVID-19 misinformation on social media*. OSF Preprints. <https://doi.org/10.31219/osf.io/5uy2f>
- 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 (JAESE)*, 5(2), 115-136. <https://doi.org/10.19030/jaese.v5i2.10221>
- Chen, Z. et Siegler, R. S. (2000). II. Overlapping Waves Theory. *Monographs of the Society for Research in Child Development*, 65(2), 7-11. <https://doi.org/10.1111/1540-5834.00075>
- Chi, M. T. H. (2005). Commonsense conceptions of emergent processes: Why some misconceptions are robust. *Journal of the Learning Sciences*, 14(2), 161-199. https://doi.org/10.1207/s15327809jls1402_1
- Claparède, H. (1911). La Question de la "Mémoire Affective". *Journal of Mental Science*, 57(239), 702-702. <https://doi.org/10.1192/bjp.57.239.702>
- Cohen, J. (1988). *The effect size index: d. Statistical power analysis for the behavioral sciences*. Routledge Academic.
- Cowan, N. (2000). Processing limits of selective attention and working memory: Potential implications for interpreting. *Interpreting*, 5(2), 117-146. <https://doi.org/10.1075/intp.5.2.05cow>

- Coxhead, A. et Hirsch, D. (2007). A pilot science-specific word list. *Revue française de linguistique appliquée*, 7(2), 65-78. <https://doi.org/10.3917/rfla.122.0065>
- Coxhead, A., Stevens, L. et Tinkle, J. (2010). Why might secondary science textbooks be difficult to read? *New Zealand Studies in Applied Linguistics*, 16(2), 37-52. <https://doi.org/10.3316/informit.893694181605406>
- Curran, T. (2000). Brain potentials of recollection and familiarity. *Memory & Cognition*, 28(6), 923-938. <https://doi.org/10.3758/BF03209340>
- Curran, T., Tepe, K. L., Piatt, C. et Tepe, K. L. (2006). Event-related potential explorations of dual processes. Dans H. D. Zimmer, A. Mecklinger et U. Lindenberger (Éd.), *Binding in Human Memory: A Neurocognitive Approach* (p. 467-492). Oxford University Press.
- Dalrymple-Alford, E. C. et Budayr, B. (1966). Examination of some aspects of the Stroop color-word test. *Perceptual and motor skills*, 23(3_suppl), 1211-1214. <https://doi.org/10.2466/pms.1966.23.3f.1211>
- Davis, J. C., Marra, C. A., Najafzadeh, M. et Liu-Ambrose, T. (2010). The independent contribution of executive functions to health-related quality of life in older women. *BMC Geriatrics*, 10(1), 16. <https://doi.org/10.1186/1471-2318-10-16>
- Dawson, C. (2014). Towards a conceptual profile: Rethinking conceptual mediation in the light of recent cognitive and neuroscientific findings. *Research in Science Education*, 44(3), 389-414. <https://doi.org/10.1007/s11165-013-9388-4>
- Delalande, L., Moyon, M., Tissier, C., Dorriere, V., Guillois, B., Mevell, K., Charron, S., Salvia, E., Poirel, N., Vidal, J., Lion, S., Oppenheim, C., Houdé, O., Cachia, A. et Borst, G. (2020). Complex and subtle structural changes in prefrontal cortex induced by inhibitory control training from childhood to adolescence. *Developmental science*, 23(4), e12898. <https://doi.org/10.1111/desc.12898>
- Dempster, F. N. (1995). Interference and inhibition in cognition: An historical perspective. Dans Dempster, F. N. et Brainerd, C. J. (Éd.), *Interference and inhibition in cognition* (p. 3-26). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-012208930-5/50002-7>
- Dempster, F. N. (1993). Resistance to interference: Developmental changes in a basic processing mechanism. Dans M. L. Howe et R. Pasnak (dir.), *Emerging Themes in Cognitive Development: Volume I: Foundations* (p. 3-27). Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4613-9220-0_1
- Denes, G. et Pizzamiglio, L. (1999). *Handbook Of Clinical and Experimental Neuropsychology*. Psychology Press.
- De Neys, W. (2021). On dual-and single-process models of thinking. *Perspectives on psychological science*, 16(6), 1412-1427. <https://doi.org/10.1177/1745691620964172>
- De Neys, W., Vartanian, O. et Goel, V. (2008). Smarter than we think when our brains detect that we are biased. *Psychological Science*, 19, 483-489. <https://doi.org/10.1111/j.1467-9280.2008.02113.x>
- Deshaies, I., Miron, J. M. et Masson, S. Effets d'une intervention pédagogique visant l'apprentissage du

- contrôle inhibiteur sur le développement de prérequis liés à l'arithmétique chez les élèves du préscolaire âgés de 5 ans. *Neuroéducation*, 6(1), 49-64. <https://doi.org/10.24046/neuroed.20200601.76>
- Diamond, A. (2013). Executive Functions. *Annual Review of Psychology*, 64(1), 135-168. <https://doi.org/10.1146/annurev-psych-113011-143750>
- diSessa, A. A. (1993). Toward an epistemology of physics. *Cognition and Instruction*, 10(2-3), 105-225. <https://doi.org/10.1080/07370008.1985.9649008>
- diSessa, A. A. (2014). A history of conceptual change research: Threads and fault lines. Dans R. K. Sawyer (dir.), *The Cambridge Handbook of the Learning Sciences* (2^e éd., p. 88-108). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139519526.007>
- Dornan, C. (2020). *La désinformation en science dans le contexte de la Covid-19*. Forum des politiques publiques.
- Dowsett, S. M. et Livesey, D. J. (2000). The development of inhibitory control in preschool children: Effects of "executive skills" training. *Developmental Psychobiology*, 36(2), 161-174. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1098-2302\(200003\)36:2<161::AID-DEV7>3.0.CO;2-0](https://doi.org/10.1002/(SICI)1098-2302(200003)36:2<161::AID-DEV7>3.0.CO;2-0)
- Driver, J. et Tipper, S. P. (1989). On the nonselectivity of "selective" seeing: Contrasts between interference and priming in selective attention. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 15(2), 304-314. <https://doi.org/10.1037/0096-1523.15.2.304>
- Duit, R. (1991). On the role of analogies and metaphors in learning science. *Science Education*, 75(6), 649-672.
- Dunbar, K. N., Fugelsang, J. A. et Stein, C. (2007). Do naïve theories ever go away? Using brain and behavior to understand changes in concepts 13. Dans K. N. Dunbar et J. A. Fulgelsang (dir.), *Thinking With Data* (p. 193-205). Psychology Press.
- Duncan, J., Dowsett, C. J., Claessens, A., Magnuson, K., Huston, A. C., Klebanov, P., Pagani, L. S., Feinstein, L., Engel, M., Brooks-Gunn, J., Sexton, H., Duckworth, K. et Japel, C. (2007). School readiness and later achievement. *Developmental Psychology*, 43(6), 1428-1446. <https://doi.org/10.1037/0012-1649.43.6.1428>
- Duncan, J., Emslie, H., Williams, P., Johnson, R. et Freer, C. (1996). Intelligence and the frontal lobe: The organization of goal-directed behavior. *Cognitive psychology*, 30(3), 257-303. <https://doi.org/10.1006/cogp.1996.0008>
- Egner, T. (2007). Congruency sequence effects and cognitive control. *Cognitive, Affective, & Behavioral Neuroscience*, 7(4), 380-390. <https://doi.org/10.3758/CABN.7.4.380>
- Egner, T. et Hirsch, J. (2005). The neural correlates and functional integration of cognitive control in a Stroop task. *Neuroimage*, 24(2), 539-547. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2004.09.007>

- Espy, K. A., McDiarmid, M. M., Cwik, M. F., Stalets, M. M., Hamby, A. et Senn, T. E. (2004). The contribution of executive functions to emergent mathematic skills in preschool children. *Developmental Neuropsychology*, 26(1), 465-486. https://doi.org/10.1207/s15326942dn2601_6
- Eslinger, P. J. (1996). Conceptualizing, describing, and measuring components of executive function: A summary. Dans G. R. Lyon et N. A. Krasnegor (Éd.), *Attention, memory, and executive function* (p. 367-395). Paul H Brookes Publishing Co. <https://doi.org/10.1097/00004703-199608000-00014>
- Evans, J. S. B. T. (2011). Dual-process theories of reasoning: Contemporary issues and developmental applications. *Developmental Review*, 31(2-3), 86-102. <https://doi.org/10.1016/j.dr.2011.07.007>
- Evans, J. S. B. T. (2018). Dual process theory. Dans De Neys, W. (Éd.), *Dual process theory 2.0* (p. 137-155). Routledge.
- Evans, J. S. B. T. et Stanovich, K. E. (2013). Dual-process theories of higher cognition: Advancing the debate. *Perspectives on Psychological Science*, 8(3), 223-241. <https://doi.org/10.1177/1745691612460685>
- Faul, F., Erdfelder, E., Buchner, A. et Lang, A.-G. (2009). Statistical power analyses using G*Power 3.1: Tests for correlation and regression analyses. *Behavior Research Methods*, 41, 1149-1160.
- Fisk, J. E. et Sharp, C. A. (2004). Age-related impairment in executive functioning: Updating, inhibition, shifting, and access. *Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology*, 26(7), 874-890. <https://doi.org/10.1080/13803390490510680>
- Field, A. (2009). *Discovering Statistics Using SPSS* (3^e éd.) Sage.
- Fischbein, H. (1987). *Intuition in science and mathematics: An educational approach*. Kluwer Academic Publishers.
- Fournier-Vicente, S., Larigauderie, P. et Gaonac'h, D. (2008). More dissociations and interactions within central executive functioning: A comprehensive latent-variable analysis. *Acta Psychologica*, 129(1), 32-48. <https://doi.org/10.1016/j.actpsy.2008.04.004>
- Freud, S. (1936). Inhibitions, symptoms and anxiety. *The Psychoanalytic Quarterly*, 5(1), 1-28. <https://doi.org/10.1080/21674086.1936.11925270>
- Friedman, N. P. et Miyake, A. (2004). The relations among inhibition and interference control functions: A latent-variable analysis. *Journal of Experimental Psychology: General*, 133(1), 101-105. <https://doi.org/10.1037/0096-3445.133.1.101>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2016.04.023>
- Friedman, N. P., Miyake, A., Robinson, J. L. et Hewitt, J. K. (2011). Developmental trajectories in toddlers' self-restraint predict individual differences in executive functions 14 years later: A behavioral genetic analysis. *Developmental Psychology*, 47(5), 1410-1430. <https://doi.org/10.1037/a0023750>

- Fuster, J. (2015). *The Prefrontal Cortex*. Academic Press.
- Gagné, R. M. (1968). Presidential address of division 15 learning hierarchies. *Educational Psychologist*, 6(1), 1-9. <https://doi.org/10.1080/00461526809528968>
- Ganea, P. A., Larsen, N. E. et Venkadasalam, V. P. (2020). The role of alternative theories and anomalous evidence in children's scientific belief revision. *Child Development*, 92(3), 1137-1153. <https://doi.org/10.1111/cdev.13481>
- Gardiner, J. M. et Java, R. I. (1993). Recognition memory and awareness: An experiential approach. *European Journal of Cognitive Psychology*, 5(3), 337-346. <https://doi.org/10.1080/09541449308520122>
- Gärtner, A. et Strobel, A. (2021). Individual differences in inhibitory control: A latent variable analysis. *Journal of Cognition*, 4(1). <http://doi.org.10.5334/joc.150>
- Garthwaite, K., France, B. et Ward, G. (2014). The complexity of scientific literacy: The development and use of a data analysis matrix. *International Journal of Science Education*, 36(10), 1568-1587. <https://doi.org/10.1080/09500693.2013.870363>
- Gathercole, S. E., Pickering, S. J., Knight, C. et Stegmann, Z. (2004). Working memory skills and educational attainment: evidence from national curriculum assessments at 7 and 14 years of age. *Applied Cognitive Psychology*, 18(1), 1-16. <https://doi.org/10.1002/acp.934>
- Gaudreau, L. (2011). *Guide pratique pour créer et évaluer une recherche scientifique en éducation*. Guérin.
- Gauthier, D., Gaudreau, D. et Routhier, G. (2007). Enseigner les sciences au primaire en passant par la formation continue. Dans M. Riopel, P. Potvin, S. et Masson (dir.), *Regards multiples sur l'enseignement des sciences* (p. 228-240). Éditions MultiMondes.
- Geurten, M., Willems, S. et Lloyd, M. (2021). Too much familiarity! The developmental path of the fluency heuristic in children. *Child Development*, 92(3), 919-936. <https://doi.org/10.1111/cdev.13449>
- Gigerenzer, G. et Todd, P. M. (2001). *Simple heuristics that make us smart*. Oxford University Press.
- Giordan, A. et de Vecchi, G. (1987). *Les origines du savoir. Des conceptions des apprenants aux concepts scientifiques*. Delachaux et Nestlé.
- Girden, E. R. (1992). *ANOVA: Repeated measures*. Sage.
- Glynn, S. M. et Muth, K. D. (1994). Reading and writing to learn science: Achieving scientific literacy. *Journal of Research in Science Teaching*, 31(9), 1057-1073. <https://doi.org/10.1002/tea.3660310915>
- Glynn, S. M. et Winter, L. K. (2004). Contextual teaching and learning of science in elementary schools. *Journal of Elementary Science Education*, 16(2), 51-63. <https://doi.org/10.1007/BF03173645>
- Gogtay, N., Giedd, J. N., Lusk, L., Hayashi, K. M., Greenstein, D., Vaituzis, A. C., Nugent, T. F., Herman, D.

- H., Clasen, L. S., Toga, A. W., Rapoport, J. L. et Thompson, P. M. (2004). Dynamic mapping of human cortical development during childhood through early adulthood. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 101(21), 8174-8179. <https://doi.org/10.1073/pnas.0402680101>
- Gomez-Zwiep, S. (2008). Elementary teachers' understanding of students' science misconceptions: Implications for practice and teacher education. *Journal of Science Teacher Education*, 19(5), 437-454. <https://doi.org/10.1007/s10972-008-9102-y>
- Gordon, B. et Caramazza, A. (1982). Lexical decision for open- and closed-class words: Failure to replicate differential frequency sensitivity. *Brain and Language*, 15(1), 143-160. [https://doi.org/10.1016/0093-934X\(82\)90053-0](https://doi.org/10.1016/0093-934X(82)90053-0)
- Gouvernement de l'Ontario (2007). *Le curriculum de l'Ontario de la 1^{re} à la 8^e année, Sciences et technologie*. Ministère de l'Éducation.
- Gouvernement du Québec (2019). *Accueillir la petite enfance : programme éducatif pour les services de garde du Québec*. Ministère de la Famille. Gouvernement du Québec.
- Gouvernement du Québec (2006a). *Programme de formation de l'école québécoise, domaine de la science et technologie au primaire*. Ministère de l'Éducation. Gouvernement du Québec.
- Gouvernement du Québec (2006b). *Programme de formation de l'école québécoise, domaine de la science et technologie au secondaire*. Ministère de l'Éducation. Gouvernement du Québec.
- Gouvernement du Québec (2021). *Programme-cycle de l'éducation préscolaire*. Ministère de l'éducation.
- Haccoun, R. R. et Cousineau, D. (2010). *Statistiques. Concepts et applications* (2^e éd.). Presses de l'Université de Montréal.
- Halpern, D. F. (2014). *Critical thinking across the curriculum: A brief edition of thought & knowledge*. Routledge.
- Harnishfeger, K. K. (1995). The development of cognitive inhibition: Theories, definitions, and research evidence. Dans F. N. Dempster, C. J. Brainerd et C. J. Brainerd (dir.), *Interference and Inhibition in Cognition* (p. 175-204). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-012208930-5/50007-6>
- Heitz, R. P. (2014). The speed-accuracy tradeoff: history, physiology, methodology, and behavior. *Frontiers in neuroscience*, 8, 150. <https://doi.org/10.3389/fnins.2014.00150>
- Hebb, D. O. (1949). *The organization of behavior; a neuropsychological theory*. Wiley.
- Henderson, J. et Wellington, J. (1998). Lowering the language barrier in learning and teaching science. *School Science Review*, 79(288), 35-46.
- Henriot-van Zanten, A. et Rayou, P. (2017). *Dictionnaire de l'éducation* (2^e éd. mise à jour). Presses Universitaires de France.
- Hitchcock, C. et Westwell, M. S. (2017). A cluster-randomised, controlled trial of the impact of Cogmed Working Memory Training on both academic performance and regulation of social, emotional and behavioural challenges. *Journal of Child Psychology and Psychiatry*, 58(2), 140-150.

<https://doi.org/10.1111/jcpp.12638>

- Hommel, B., Proctor, R. W. et Vu, K. P. L. (2004). A feature-integration account of sequential effects in the Simon task. *Psychological research*, 68(1), 1-17. <https://doi.org/10.1007/s00426-003-0132-y>
- Houdé, O. (2011). Imagerie cérébrale, cognition et pédagogie - Imagerie et cognition. *Médecine/Sciences*, 27(5), 535-539. <https://doi.org/10.1051/medsci/2011275020>
- Houdé, O. (2014). *Apprendre à résister*. Le Pommier.
- Houdé, O. (2016). Pour une pédagogie scientifique: allers-retours du labo à l'école. *Administration & Éducation*, 152(4), 9. <https://doi.org/10.3917/admed.152.0009>
- Houdé, O. (2018). *L'école du cerveau*. Mardaga.
- Houdé, O. (2020). *L'inhibition au service de l'intelligence*. Presses Universitaires de France.
- Houdé, O. et Borst, G. (2015). Evidence for an inhibitory-control theory of the reasoning brain. *Frontiers in Human Neuroscience*, 9, 148. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2015.00148>
- Houdé, O. et Borst, G. (2018). *Le cerveau et les apprentissages*. Nathan.
- Houdé, O. et Guichart, E. (2001). Negative priming effect after inhibition of number/length interference in a Piaget-like task. *Developmental Science*, 4(1), 119-123. <https://doi.org/10.1111/1467-7687.00156>
- Houdé, O., Pineau, A., Leroux, G., Poirel, N., Perchey, G., Lanoë, C., Lubin, A., Turbelin, M.-R., Rossi, S., Simon, G., Delcroix, N., Lambertson, F., Vigneau, M., Wisniewski, G., Vicet, J.-R. et Mazoyer, B. (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. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2011.04.008>
- Houdé, O., Zago, L., Crivello, F., Moutier, S., Pineau, A., Mazoyer, B., et Tzourio-Mazoyer, N. (2001). Access to deductive logic depends on a right ventromedial prefrontal area devoted to emotion and feeling: Evidence from a training paradigm. *Neuroimage*, 14(6), 1486-1492. <https://doi.org/10.1006/nimg.2001.0930>
- Houdé, O., Zago, L., Mellet, E., Moutier, S., Pineau, A., Mazoyer, B. et Tzourio-Mazoyer, N. (2000). Shifting from the perceptual brain to the logical brain: The neural impact of cognitive inhibition training. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 12(5), 721-728. <https://doi.org/10.1162/089892900562525>
- Hsin, C.-T. et Wu, H.-K. (2011). Using scaffolding strategies to promote young children's scientific understandings of floating and sinking. *Journal of Science Education and Technology*, 20(5), 656-666. <https://doi.org/10.1007/s10956-011-9310-7>
- Huster, R. J., Westerhausen, R., Pantev, C. et Konrad, C. (2010). The role of the cingulate cortex as neural generator of the N200 and P300 in a tactile response inhibition task. *Human Brain Mapping*, 31(8), 1260-1271. <https://doi.org/10.1002/hbm.20933>

- Huttenlocher, P. R. et Dabholkar, A. S. (1997). Regional differences in synaptogenesis in human cerebral cortex. *Journal of Comparative Neurology*, 387(2), 167-178. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1096-9861\(19971020\)387:2<167::AID-CNE1>3.0.CO;2-Z](https://doi.org/10.1002/(SICI)1096-9861(19971020)387:2<167::AID-CNE1>3.0.CO;2-Z)
- Jacobs, G. (1989). Word usage misconceptions among first-year university physics students. *International Journal of Science Education*, 11(4), 395-399. <https://doi.org/10.1080/0950069890110404>
- Jacobson, N. G., Thacker, I. et Sinatra, G. M. (2022). Here's hoping it's not just text structure: The role of emotions in knowledge revision and the backfire effect. *Discourse Processes*, 59(1-2), 13-35. <https://doi.org/10.1080/0163853X.2021.1925059>
- Jacoby, L. L., Toth, J. P. et Yonelinas, A. P. (1993). Separating conscious and unconscious influences of memory: Measuring recollection. *Journal of Experimental Psychology: General*, 122(2), 139-154. <https://doi.org/10.1037/0096-3445.122.2.139>
- Janiszewski, C. et Wyer Jr, R. S. (2014). Content and process priming: A review. *Journal of Consumer Psychology*, 24(1), 96-118. <https://doi.org/10.1016/j.jcps.2013.05.006>
- Jensen, M. S. et Finley, F. N. (1995). Teaching evolution using historical arguments in a conceptual change strategy. *Science Education*, 79(2), 147-166. <https://doi.org/10.1002/sce.3730790203>
- Jonassen, D. H. et Hung, W. (2015). All problems are not equal: Implications for problem-based learning. Dans A. Walker, H. Leary, C. E. Hmelo-Silver et P. A. Ertmer (éd.), *Essential readings in problem-based learning* (p. 17-42). Purdue University Press.
- Johnstone, A. H. (1982). Macro and microchemistry. *Chemistry in Britain*, 18(6), 409-410.
- Johnstone, A. H. (1985). *The relationship between performances in word association tests and achievement in chemistry*, 7(1), 57-66.
- Johnstone, A. H. (1991). Why is science difficult to learn? Things are seldom what they seem. *Journal of Computer Assisted Learning*, 7(2), 75-83.
- Johnstone, A. H. (1997). How Long Is a Chain? Reasoning in Science. *School Science Review*, 78(285), 73-77.
- Johnstone, A. H. et Selepeng, D. (2001). A language problem revisited. *Chem. Educ. Res. Pract.*, 2(1), 19-29. <https://doi.org/10.1039/B0RP90028A>
- Kahneman, D. (2011). *Thinking, fast and slow*. Macmillan.
- Kahneman, D., Slovic, P. et Tversky, A. (dir.). (1982). *Judgment under Uncertainty: Heuristics and Biases*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511809477>
- Kandel, E. R., Schwartz, J. H., Jessell, T. M., Siegelbaum, S., Hudspeth, A. J. et Mack, S. (2000). *Principles of neural science*. McGraw-Hill.
- Kane, M. J., Hasher, L., Stoltzfus, E. R., Zacks, R. T. et Connelly, S. L. (1994). Inhibitory attentional mechanisms and aging. *Psychology and Aging*, 9(1), 103-112. <https://doi.org/10.1037/0882->

[7974.9.1.103](#)

- Karbach, J. et Kray, J. (2009). How useful is executive control training? Age differences in near and far transfer of task-switching training. *Developmental Science*, 12(6), 978-990. <https://doi.org/10.1111/j.1467-7687.2009.00846.x>
- Karr, J. E., Areshenkoff, C. N., Rast, P., Hofer, S. M., Iverson, G. L. et Garcia-Barrera, M. A. (2018). The unity and diversity of executive functions: A systematic review and re-analysis of latent variable studies. *Psychological Bulletin*, 144(11), 1147. <https://doi.org/10.1037/bul0000160>
- Kelemen, D. et Rosset, E. (2009). The human function compunction: Teleological explanation in adults. *Cognition*, 111(1), 138-143. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2009.01.001>
- Kelemen, D., Rottman, J. 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. <https://doi.org/10.1037/a0030399>
- Kellner, E., Gullberg, A., Attorps, I., Thorén, I. et Tärneberg, R. (2011). Prospective teachers' initial conceptions about pupils' difficulties in science and mathematics: A potential resource in teacher education. *International Journal of Science and Mathematics Education*, 9(4), 843-866. <https://doi.org/10.1007/s10763-010-9232-5>
- King, C. J. H. (2010). An analysis of misconceptions in science textbooks: Earth science in England and Wales. *International Journal of Science Education*, 32(5), 565-601. <https://doi.org/10.1080/09500690902721681>
- Kosinski, R. J. (2008). A literature review on reaction time. *Clemson University*, 10(1), 337-344.
- Kovalik, S. et Olsen, K. (2010). *Kid's eye view of science: a conceptual, integrated approach to teaching science, K-6*. Corwin Press.
- Kwon, Y.-J. et Lawson, A. E. (2000). Linking brain growth with the development of scientific reasoning ability and conceptual change during adolescence. *Journal of Research in Science Teaching*, 37(1), 44-62. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1098-2736\(200001\)37:1<44::AID-TEA4>3.0.CO;2-J](https://doi.org/10.1002/(SICI)1098-2736(200001)37:1<44::AID-TEA4>3.0.CO;2-J)
- Kunda, Z. (1990). The case for motivated reasoning. *Psychological Bulletin*, 108(3), 480-498. <https://doi.org/10.1037/0033-2909.108.3.480>
- Ladyman, J., Lambert, J. et Wiesner, K. (2013). What is a complex system? *European Journal for Philosophy of Science*, 3(1), 33-67. <https://doi.org/10.1007/s13194-012-0056-8>
- La Langue Française. (s. d.). *Complexité*. Dans La Langue Française, Dictionnaire en ligne. Consulté le 25 février 2022. <https://www.lalanguefrancaise.com/dictionnaire/definition/complexite>
- Lafortune, S. (2013). Le rôle de l'inhibition dans la capacité à surmonter des interférences intuitives en sciences [Mémoire de maîtrise, Université du Québec à Montréal]. Archipel. <https://archipel.uqam.ca/5685/>
- Landa, L. N. (1955). "K psikhologii formirovania metodov rassuzhdeniya/na materiale resheniya

geometricheskikh zadach na dokazatelstvo uchashchimisya VII–VIII klassov” (On Psychology of the Formation of Methods for Reasoning/On Material of Student’s Solution of Geometrical Problems by Proof) [Candidate of Pedagogical Sciences (In Psychology)].

- Landa, L. N. (1976). *Instructional regulation and control: Cybernetics, algorithmization, and heuristics in education*. Educational Technology.
- Lanoë, C., Vidal, J., Lubin, A., Houdé, 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. <https://doi.org/10.1016/j.cogdev.2015.10.005>
- Larousse. (s. d.). *Familiarité*. Dans Dictionnaire Larousse en ligne. Consulté le 18 février 2022 au <https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/familiarit%C3%A9/32792>
- Larousse. (s. d.). *Complexité*. Dans Dictionnaire Larousse en ligne. Consulté le 25 février 2022 au <https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/complexit%C3%A9/17700>
- Larson, M. J., Kaufman, D. A., & Perlstein, W. M. (2009). Neural time course of conflict adaptation effects on the Stroop task. *Neuropsychologia*, 47(3), 663-670. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2008.11.013>
- Legendre, M.-F. (2007). Enseigner les sciences dans une double perspective de continuité et de rupture. Dans M. Riopel, P. Potvin, S. Masson (dir.), *Regards multiples sur l’enseignement des sciences* (p. 293-307). Éditions MultiMondes.
- Legendre, R. (2005). *Dictionnaire actuel de l’éducation* (3^e éd.). Guérin.
- Letang, M., Citron, P., Garbarg - Chenon, J., Houdé, O. et Borst, G. (2021). Bridging the gap between the lab and the classroom: An online citizen scientific research project with teachers aiming at improving inhibitory control of school-age children. *Mind, Brain, and Education*, 15(1), 122-128. <https://doi.org/10.1111/mbe.12272>
- Le Robert. (s. d.). *Familiarité*. Dans Le Robert Dico en ligne. Consulté le 18 février 2022 au <https://dictionnaire.lerobert.com/definition/familiarite>
- Le Robert. (s. d.). *Complexité*. Dans Le Robert Dico en ligne. Consulté le 25 février 2022 au <https://dictionnaire.lerobert.com/definition/complexite>
- Limón, M. (2001). On the cognitive conflict as an instructional strategy for conceptual change: A critical appraisal. *Learning and instruction*, 11(4-5), 357-380. [https://doi.org/10.1016/S0959-4752\(00\)00037-2](https://doi.org/10.1016/S0959-4752(00)00037-2)
- Lin, J., Xing, Y., Hu, Y., Zhang, J., Bao, L., Luo, K. et Xiao, Y. (2023). Inhibitory control involvement in overcoming the position-velocity indiscriminatio misconception among college physics majors. *Physical Review Physics Education Research*, 19(1), 010112. <https://doi.org.10.1103/PhysRevPhysEducRes.19.010112>
- Lombrozo, T., Kelemen, D. et Zaitchik, D. (2007). Inferring Design: Evidence of a Preference for Teleological Explanations in Patients With Alzheimer’s Disease. *Psychological Science*, 18(11),

999-1006. <https://doi.org/10.1111/j.1467-9280.2007.02015.x>

- Lubin, A., Lanoë, C., Pineau, A. et Rossi, S. (2012). Apprendre à inhiber : une pédagogie innovante au service des apprentissages scolaires fondamentaux (mathématiques et orthographe) chez des élèves de 6 à 11 ans. *Neuroéducation*, 1(1), 55-84. <https://doi.org/10.24046/neuroed.20120101.55>
- 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. <https://doi.org/10.1037/a0032625>
- Luce, R. D. (1986). *Response times: Their role in inferring elementary mental organization*. Oxford University Press on Demand.
- Luna, B. (2009). Developmental changes in cognitive control through adolescence. *Advances in Child Development and Behavior*, 37, 233-278. [https://doi.org/10.1016/S0065-2407\(09\)03706-9](https://doi.org/10.1016/S0065-2407(09)03706-9)
- MacLeod, C. M. (1991). Half a century of research on the Stroop effect: An integrative review. *Psychological Bulletin*, 109(2), 163-203. <https://doi.org/10.1037/0033-2909.109.2.163>
- Makris, N., Biederman, J., Valera, E. M., Bush, G., Kaiser, J., Kennedy, D. N., Caviness, V. S., Faraone, S. V. et Seidman, L. J. (2007). Cortical thinning of the attention and executive function networks in adults with attention-deficit/hyperactivity disorder. *Cerebral Cortex*, 17(6), 1364-1375. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhl047>
- Malenfant-Robichaud, G. (2018). *Inhibition et capacité à surmonter certaines conceptions alternatives en chimie* [Mémoire de maîtrise, Université du Québec à Montréal]. Archipel. <https://archipel.uqam.ca/11334/>
- Marchildon, L. (2021, 8 octobre). *Des raisons de faire confiance à la science*. Le Devoir. <https://www.ledevoir.com/societe/le-devoir-de-philo-histoire/635307/devoir-de-philo-des-raisons-de-faire-confiance-a-la-science>
- Mareschal, D. (2016). The neuroscience of conceptual learning in science and mathematics. *Current Opinion in Behavioral Sciences*, 10, 114-118. <https://doi.org/10.1016/j.cobeha.2016.06.001>
- Marshall, S., Gilmour, M. et Lewis, D. (1991). Words that matter in science and technology. *Research in Science & Technological Education*, 9(1), 5-16. <https://doi.org/10.1080/0263514910090102>
- Mason, L. et Zaccoletti, S. (2021). Inhibition and conceptual learning in science: A review of studies. *Educational Psychology Review*, 33(1), 181-212. <https://doi.org/10.1007/s10648-020-09529-x>
- Mason, L., Zaccoletti, S., Carretti, B., Scrimin, S. et Diakidoy, I.-A. N. (2019). The role of inhibition in conceptual learning from refutation and standard expository texts. *International Journal of Science and Mathematics Education*, 17(3), 483-501. <https://doi.org/10.1007/s10763-017-9874-7>
- Masson, S. (2020). *Activer ses neurones: pour mieux apprendre et enseigner*. Odile Jacob.

- Masson, S., et Borst, G. (2017). *Méthodes de recherche en neuroéducation*. Presses de l'Université du Québec.
- Masson, S. et Brault Foisy, L.-M. (2014). Fundamental concepts bridging education and the brain. *McGill Journal of Education*, 49(2), 501-512. <https://doi.org/10.7202/1029432ar>
- Masson, S., Potvin, P., Riopel, M. et Foisy, L.-M. B. (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. <https://doi.org/10.1111/mbe.12043>
- McComas, W., Almazroa, H. et Clough, M. P. (1998). The nature of science in science education: an introduction. *Science & Education*, 7(6), 511-532. <https://doi.org/10.1023/A:1008642510402>
- McKoon, G. et Ratcliff, R. (1992). Spreading activation versus compound cue accounts of priming: Mediated priming revisited. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 18, 1155-1172.
- Millar, R. (1991). Why is science hard to learn? *Journal of Computer Assisted Learning*, 7(2), 66-74. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2729.1991.tb00229.x>
- Minier, P., et Gauthier, D. (2006). Représentations des activités d'enseignement-apprentissage en sciences et liens avec les stratégies pédagogiques déployées par des enseignants du primaire. *Journal international sur les représentations sociales*, 3(1), 35-46.
- Mischel, W. (1974). Processes in delay of gratification. Dans L. Berkowitz (dir.), *Advances in Experimental Social Psychology* (vol. 7, p. 249-292). Academic Press. [https://doi.org/10.1016/S0065-2601\(08\)60039-8](https://doi.org/10.1016/S0065-2601(08)60039-8)
- Mischel, W., Shoda, Y. et Rodriguez, M. L. (1989). Delay of gratification in children. *Science*, 244(4907), 933-938. <https://doi.org/10.1126/science.2658056>
- 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. <https://doi.org/10.1177/0963721411429458>
- Miyake, A., Friedman, N. P., Emerson, M. J., Witzki, A. H., Howerter, A. et Wager, T. D. (2000). The unity and diversity of executive functions and their contributions to complex "frontal lobe" tasks: A latent variable analysis. *Cognitive Psychology*, 41(1), 49-100. <https://doi.org/10.1006/cogp.1999.0734>
- Moffitt, T. E., Arseneault, L., Belsky, D., Dickson, N., Hancox, R. J., Harrington, H., Houts, R., Poulton, R., Roberts, B. W., Ross, S., Sears, M. R., Thomson, W. M. et Caspi, A. (2011). A gradient of childhood self-control predicts health, wealth, and public safety. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 108(7), 2693-2698. <https://doi.org/10.1073/pnas.1010076108>
- Mogk, D. W. et Goodwin, C. A. (2012). *Learning in the field: Synthesis of research on thinking and learning in the geosciences*, 486, 131-163.
- Morin, E. et Moigne, J. L. L. (1999). *L'intelligence de la Complexité*. L'Harmattan.

- Mortimer, E. F. (1995). Conceptual change or conceptual profile change?. *Science & Education*, 4, 267-285. <https://doi.org/10.1007/BF00486624>
- Mostofsky, S. H. et Simmonds, D. J. (2008). Response inhibition and response selection: Two sides of the same coin. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 20(5), 751-761. <https://doi.org/10.1162/jocn.2008.20500>
- Moutier, S., Plagne-Cayeux, S., Melot, A. M. et Houdé, O. (2006). Syllogistic reasoning and belief-bias inhibition in school children: Evidence from a negative priming paradigm. *Developmental Science*, 9(2), 166-172. <https://doi.org/10.1111/j.1467-7687.2006.00476.x>
- Mullis, I. V. S., Martin, M. O. et Foy, P. (2020). TIMSS 2019 International results in mathematics and science. Dans *TIMSS & PIRLS International Study Center, International Association for the Evaluation of Educational Achievement*.
- Murphy, P.K. et Alexander, P.A. (2008). The role of knowledge, beliefs, and interest in the conceptual change process: a synthesis and meta-analysis of the research. Dans S. Vosniadou (éd.), *International handbook of research on conceptual change* (p. 583-618). Routledge.
- Navarro C. et Foxcroft, D. (2019). *Apprentissage des statistiques avec Jamovi : un tutoriel pour les débutants en psychologie et autres débutants*. Institut d'enseignement à distance. Université Paris 8.
- Neill, W. T., Valdes, L. A. et Terry, K. M. (1995). Selective attention and the inhibitory control of cognition. Dans Dempster, F. N. et Brainerd, C. J. (éd.), *Interference and inhibition in cognition* (p. 207-261). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-012208930-5/50008-8>
- Nersessian, N. J. (1989). Conceptual change in science and in science education. *Synthese*, 80(1), 163-183. <https://doi.org/10.1007/BF00869953>
- Newell, A. et Simon, H. A. (1972). *Human problem solving*. Prentice-Hall.
- Nguyen, T. et Duncan, G. J. (2019). Kindergarten components of executive function and third grade achievement: A national study. *Early Childhood Research Quarterly*, 46, 49-61. <https://doi.org/10.1016/j.ecresq.2018.05.006>
- Nigg, J. T. (2000). On inhibition/disinhibition in developmental psychopathology: Views from cognitive and personality psychology and a working inhibition taxonomy. *Psychological Bulletin*, 126(2), 220-246. <https://doi.org/10.1037/0033-2909.126.2.220>
- Nussbaumn, J. et Novick, S. (1982). Alternative frameworks, conceptual conflict and accommodation: Toward a principled teaching strategy. *Instructional Science*, 11(3), 183-200.
- Obersteiner, A., Van Dooren, W., Van Hoof, J. et Verschaffel, L. (2013). The natural number bias and magnitude representation in fraction comparison by expert mathematicians. *Learning and Instruction*, 28, 64-72. <https://doi.org/10.1016/j.learninstruc.2013.05.003>
- O.C.D.E. (2002). *Understanding the brain: Towards a new learning science*. Éditions de l'OCDE. <https://doi.org/10.1787/9789264174986-en>

- O.C.D.E. (2007). *Comprendre le cerveau : Naissance d'une nouvelle science de l'apprentissage*. Éditions de l'OCDE.
- O.C.D.E. (2008). *Regards sur l'éducation 2008 : Les indicateurs de l'OCDE*. Éditions de l'OCDE.
- O.C.D.E. (2018). *Science, technologie et innovation : Perspectives de l'OCDE 2018 (version abrégée)*. Éditions de l'OCDE.
- O.C.D.E. (2019a). *Compétences en sciences (PISA)*. Éditions de l'OCDE.
- O.C.D.E. (2019b). *PISA 2018 Results. Volume I: What Students Know and Can Do*. Éditions de l'OCDE.
- Okoli, C. et Pawlowski, S. D. (2004). The Delphi method as a research tool: An example, design considerations and applications. *Information & Management*, 42(1), 15-29. <https://doi.org/10.1016/j.im.2003.11.002>
- Osborne, J., Simon, S. et Collins, S. (2003). Attitudes towards science: A review of the literature and its implications. *International Journal of Science Education*, 25(9), 1049-1079. <https://doi.org/10.1080/0950069032000032199>
- Ohlsson, S. (2009). Resubsumption: A possible mechanism for conceptual change and belief revision. *Educational Psychologist*, 44(1), 20-40. <https://doi.org/10.1080/00461520802616267>
- Olesen, P. J., Westerberg, H. et Klingberg, T. (2004). Increased prefrontal and parietal activity after training of working memory. *Nature Neuroscience*, 7(1), 75-79. <https://doi.org/10.1038/nn1165>
- Opfer, J. E. et Siegler, R. S. (2004). Revisiting preschoolers' living things concept: A microgenetic analysis of conceptual change in basic biology. *Cognitive Psychology*, 49(4), 301-332. <https://doi.org/10.1016/j.cogpsych.2004.01.002>
- Osborne, J., Simon, S. et Collins, S. (2003). Attitudes towards science: A review of the literature and its implications. *International Journal of Science Education*, 25(9), 1049-1079. <https://doi.org/10.1080/0950069032000032199>
- Packwood, S., Hodgetts, H. M. et Tremblay, S. (2011). A multiperspective approach to the conceptualization of executive functions. *Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology*, 33(4), 456-470. <https://doi.org/10.1080/13803395.2010.533157>
- Pennycook, G. (2018). A perspective on the foundation of dual process models. Dans De Neys, W. (éd.), *Dual process theory 2.0* (p. 6-26). Routledge.
- Pensa, P. (2006, 1^{er} septembre). *Nomen Est Omen: How Company Names Influence Short- and Long-Run Stock Market Performance* (924171) [SSRN Scholarly Paper]. Social Science Research Network. <https://doi.org/10.2139/ssrn.924171>
- Peterson, L. et Peterson, M. J. (1959). Short-term retention of individual verbal items. *Journal of experimental psychology*, 58(3), 193-198. <https://doi.org/10.1037/h0049234>
- Piaget, J. (1929). *The child's conception of the world*. Routledge.

- Piaget, J. et Inhelder, B. (1966). *La psychologie de l'enfant*. Presses universitaires de France.
- Pinotsis, D. A., Buschman, T. J. et Miller, E. K. (2019). Working memory load modulates neuronal coupling. *Cerebral Cortex*, 29(4), 1670-1681. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhy065>
- Planinic, M., Boone, W. J., Krsnik, R. et Beilfuss, M. L. (2006). Exploring alternative conceptions from newtonian dynamics and simple DC circuits: Links between item difficulty and item confidence. *Journal of Research in Science Teaching*, 43(2), 150-171. <https://doi.org/10.1002/tea.20101>
- Posner, G. J., Strike, K. A., Hewson, P. W. et Gertzog, W. A. (1982). Accommodation of a scientific conception: Toward a theory of conceptual change. *Science Education*, 66(2), 211-227. <https://doi.org/10.1002/sce.3730660207>
- Potvin, P. (2013). Proposition for improving the classical models of conceptual change based on neuroeducational evidence: conceptual prevalence. *Neuroéducation*, 2(1), 16-43. <https://doi.org/10.24046/neuroed.20130201.16>
- Potvin, P. (2018). *Faire apprendre les sciences et la technologie à l'école : épistémologie, didactique, sciences cognitives et neurosciences au service de l'enseignant*. Presses de l'Université Laval.
- Potvin, P. et Cyr, G. (2017). Toward a durable prevalence of scientific conceptions: Tracking the effects of two interfering misconceptions about buoyancy from preschoolers to science teachers. *Journal of Research in Science Teaching*, 54(9), 1121-1142. <https://doi.org/10.1002/tea.21396>
- Potvin, P. et Hasni, A. (2014a). Analysis of the decline in interest towards school science and technology from grades 5 through 11. *Journal of Science Education and Technology*, 23(6), 784-802. <https://doi.org/10.1007/s10956-014-9512-x>
- Potvin, P. et Hasni, A. (2014b). Interest, motivation and attitude towards science and technology at K-12 levels: A systematic review of 12 years of educational research. *Studies in Science Education*, 50(1), 85-129. <https://doi.org/10.1080/03057267.2014.881626>
- Potvin, P., Masson, S., Lafortune, S. et Cyr, G. (2015a). 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. <https://doi.org/10.1007/s10763-014-9520-6>
- Potvin, P., Nenciovici, L., Malenfant-Robichaud, G., Thibault, F., Sy, O., Mahhou, M. A., ... et Chastenay, P. (2020). Models of conceptual change in science learning: Establishing an exhaustive inventory based on support given by articles published in major journals. *Studies in Science Education*, 56(2), 157-211. <https://doi.org/10.1080/03057267.2020.1744796>
- Potvin, P., Sauriol, É. et Riopel, M. (2015b). 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. <http://doi.org/10.1002/tea.21235>
- Price, C., Wise, R., Ramsay, S., Friston, K., Howard, D., Patterson, K. et Frackowiak, R. (1992). Regional response differences within the human auditory cortex when listening to words. *Neuroscience Letters*, 146(2), 179-182. [https://doi.org/10.1016/0304-3940\(92\)90072-F](https://doi.org/10.1016/0304-3940(92)90072-F)

- Ratcliff, R. (1978). A theory of memory retrieval. *Psychological Review*, 85(2), 59-108.
<https://doi.org/10.1037/0033-295X.85.2.59>
- Ratcliff, R. (1993). Methods for dealing with reaction time outliers. *Psychological Bulletin*, 114(3), 510–532. <https://doi.org/10.1037/0033-2909.114.3.510>
- Raynal, F. et Rieunier, A. (2014). *Pédagogie, dictionnaire des concepts clés apprentissage, formation, psychologie cognitive* (10^e édition). ESF éditeur.
- Reiner, M., Slotta, J. D., Chi, M. T. H. et Resnick, L. B. (2000). Naive physics reasoning: A commitment to substance-based conceptions. *Cognition and Instruction*, 18(1), 1-34.
https://doi.org/10.1207/S1532690XCI1801_01
- Renouard, A. et Mazabraud, Y. (2018). Context-based learning for Inhibition of alternative conceptions: The next step forward in science education. *NPJ Science of Learning*, 3(1), 1-6.
<https://doi.org/10.1038/s41539-018-0026-9>
- Réseau Réussite Montréal (2021). *Lecture et persévérance scolaire*.
<https://www.reseautreussitemontreal.ca/dossiers-thematiques/lecture-et-perserverance-scolaire/>
- Roediger, H. L. et McDermott, K. B. (1993). Implicit memory in normal human subjects. Dans F. Boller et J. Grafman (éd.), *Handbook of Neuropsychology* (vol. 8, p. 63-131). Elsevier.
- Rhodes, S. M., Booth, J. N., Campbell, L. E., Blythe, R. A., Wheate, N. J. et Delibegovic, M. (2014). Evidence for a role of executive functions in learning biology. *Infant and Child Development*, 23(1), 67-83. <https://doi.org/10.1002/icd.1823>
- Roëll, M., Viarouge, A., Houdé, O. et Borst, G. (2019). Inhibition of the whole number bias in decimal number comparison: A developmental negative priming study. *Journal of Experimental Child Psychology*, 177, 240-247. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2018.08.010>
- Ronfard, S., Brown, S., Doncaster, E. et Kelemen, D. (2021). Inhibiting intuition: Scaffolding children's theory construction about species evolution in the face of competing explanations. *Cognition*, 211, 104635. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2021.104635>
- Rosburg, T., Mecklinger, A. et Frings, C. (2011). When the brain decides: A familiarity-based approach to the recognition heuristic as evidenced by event-related brain potentials. *Psychological Science*, 22(12), 1527-1534. <https://doi.org/10.1177/0956797611417454>
- Rossi, S., Lubin, A., Lanoë, C. et Pineau, A. (2012). Une pédagogie du contrôle cognitif pour l'amélioration de l'attention à la consigne chez l'enfant de 4-5 ans. *Neuroéducation*, 1, 29-54.
<https://doi.org/10.24046/neuroed.20120101.29>
- Rossi, S., Vidal, J., Letang, M., Houdé, O. et Borst, G. (2019). Adolescents and adults need inhibitory control to compare fractions. *Journal of Numerical Cognition*, 5(3), 314-336.
<https://doi.org/10.5964/jnc.v5i3.197>
- Sala, G. et Gobet, F. (2017). Does far transfer exist? Negative evidence from chess, music, and working memory training. *Current Directions in Psychological Science*, 26(6), 515-520.

<https://doi.org/10.1177/0963721417712760>

- Salo, R., Henik, A. et Robertson, L. C. (2001). Interpreting Stroop interference: An analysis of differences between task versions. *Neuropsychology*, 15(4), 462-471. <https://doi.org/10.1037/0894-4105.15.4.462>
- Sears, S. J. (2002). *Contextual teaching and learning: A primer for effective instruction*. Phi Delta Kappa International.
- Shilling, V. M., Chetwynd, A. et Rabbitt, P. M. A. (2002). Individual inconsistency across measures of inhibition: An investigation of the construct validity of inhibition in older adults. *Neuropsychologia*, 40(6), 605-619. [https://doi.org/10.1016/S0028-3932\(01\)00157-9](https://doi.org/10.1016/S0028-3932(01)00157-9)
- Shtulman, A. et Harrington, K. (2015). Tensions between science and intuition across the lifespan. *Topics in Cognitive Science*, 8(1), 118-137. <https://doi.org/10.1111/tops.12174>
- Shtulman, A. et Valcarcel, J. (2012). Scientific knowledge suppresses but does not supplant earlier intuitions. *Cognition*, 124(2), 209-215. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2012.04.005>
- Siegler, R. S. (1996). *Emerging minds: The process of change in children's thinking*. Oxford University Press.
- Smolleck, L. A. et Hershberger, V. (2011). Playing with science: An investigation of young children's science conceptions and misconceptions. *Current Issues in Education*, 14(1), 1-31.
- Sinatra, G. M., Kienhues, D. et Hofer, B. K. (2014). Addressing challenges to public understanding of science: Epistemic cognition, motivated reasoning, and conceptual Change. *Educational Psychologist*, 49(2), 123-138. <https://doi.org/10.1080/00461520.2014.916216>
- Skelling-Desmeules, Y., Brault Fois, 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. <https://doi.org/10.1187/cbe.19-11-0244>
- Snow, C. E. (2010). Academic language and the challenge of reading for learning about science. *Science*, 328(5977), 450-452. <https://doi.org/10.1126/science.1182597>
- Solomon, J. (1983). Learning about energy: how pupils think in two domains. *European Journal of Science Education*, 5(1), 49-59. <https://doi.org/10.1080/0140528830050105>
- Solomon, J. (1984). Prompts, cues and discrimination: The utilization of two separate knowledge systems. *European Journal of Science Education*, 6(3), 277-284. <https://doi.org/10.1080/0140528840060309>
- Solomon, J. (1987). Social influences on the construction of pupils' understanding of science. *Studies in Science Education*, 14(1), 63-82. <https://doi.org/10.1080/03057268708559939>
- Spieler D. (2000). *Encyclopaedia of psychology*, 7, 12-14.
- St Clair-Thompson, H. L. et Gathercole, S. E. (2006). Executive functions and achievements in school:

- Shifting, updating, inhibition, and working memory. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 59(4), 745-759. <https://doi.org/10.1080/17470210500162854>
- Stahl, E. (2011). The generative nature of epistemological judgments: Focusing on interactions instead of elements to understand the relationship between epistemological beliefs and flexibility. Dans J. Elen, E. Stahl, R. Bromme et G. Clarebout (dir.), *Links Between Beliefs and Cognitive Flexibility: Lessons Learned* (p. 37-60). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-007-1793-0_3
- Stanovich, K. E. et West, R. F. (2000). Individual differences in reasoning: Implications for the rationality debate? *Behavioral and Brain Sciences*, 23(5), 645-665. <https://doi.org/10.1017/S0140525X00003435>
- Stavy, R. (1991). Using analogy to overcome misconceptions about conservation of matter. *Journal of research in science teaching*, 28(4), 305-313. <https://doi.org/10.1002/tea.3660280404>
- Stavy, R. et Babai, R. (2010). Overcoming intuitive interference in mathematics: Insights from behavioral, brain imaging and intervention studies. *ZDM*, 42(6), 621-633. <https://doi.org/10.1007/s11858-010-0251-z>
- Stavy, R. et Tirosh, D. (2000). *How students (mis-) understand science and mathematics: Intuitive rules*. Teachers College Press.
- Stavy, R., Tsamir, P. et Tirosh, D. (2002). Intuitive rules: The case of "More A - More B". Dans M. Limón et L. Mason (dir.), *Reconsidering Conceptual Change: Issues in Theory and Practice* (p. 217-231). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/0-306-47637-1_12
- Steel, C., Haworth, E. J., Peters, E., Hemsley, D. R., Sharma, T., Gray, J. A., ... et Williams, S. C. R. (2001). Neuroimaging correlates of negative priming. *Neuroreport*, 12(16), 3619-3624.
- Stroop, J. R. (1935). Studies of interference in serial verbal reactions. *Journal of Experimental Psychology*, 18(6), 643-662. <https://doi.org/10.1037/h0054651>
- Suryawati, E. et Osman, K. (2017). Contextual learning: Innovative approach towards the development of students' scientific attitude and natural science performance. *EURASIA Journal of Mathematics, Science and Technology Education*, 14(1). <https://doi.org/10.12973/ejmste/79329>
- Sweller, J., van Merriënboer, J. J. G. et Paas, F. (2019). Cognitive architecture and instructional design: 20 years later. *Educational Psychology Review*, 31(2), 261-292. <https://doi.org/10.1007/s10648-019-09465-5>
- Sweller, J., van Merriënboer, J. J. G. et Paas, F. G. W. C. (1998). Cognitive architecture and instructional design. *Educational Psychology Review*, 10(3), 251-296. <https://doi.org/10.1023/A:1022193728205>
- Thouin, M. (1996). *Les conceptions des élèves et les activités d'apprentissage en sciences de la nature au primaire*. Université de Montréal, Vice-décanat à la recherche. <https://eduq.info/xmlui/handle/11515/19943>
- Thouin, M. (2015). *Tester et enrichir sa culture scientifique et technologique*. Éditions MultiMondes.

- Thouin, M. (2017). *Enseigner les sciences et les technologies au préscolaire et au primaire* (3^e édition revue et augmentée). Éditions MultiMondes.
- Tiberghien, G. et Abdi, H. (Éd). (2002). *Dictionnaire des sciences cognitives*. Armand Colin.
- TIMSS Encyclopedia (2015). The science curriculum in primary and lower secondary grades. *TIMSS 2015 Encyclopedia*. <http://timssandpirls.bc.edu/timss2015/encyclopedia/countries/>
- Tipper, S. P. (2001). Does negative priming reflect inhibitory mechanisms? A review and integration of conflicting views. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 54(2), 321-343. <https://doi.org/10.1080/713755969>
- Tipper, S. P. (1985). The negative priming effect: Inhibitory effects of ignored primes. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 37(4), 571-590. <https://doi.org/10.1080/14640748508400920>
- Tipper, S. P. et Cranston, M. (1985). Selective attention and priming: Inhibitory and facilitatory effects of ignored primes. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology Section A*, 37(4), 591-611. <https://doi.org/10.1080/14640748508400921>
- Toussaint, R. M. J. (2002). *Changement conceptuel et apprentissage des sciences. Recherches et pratiques*. Les Éditeurs Logiques.
- Tsai, C.-C. (2001). Ideas about earthquakes after experiencing a natural disaster in Taiwan: An analysis of students' worldviews. *International Journal of Science Education*, 23(10), 1007-1016. <https://doi.org/10.1080/09500690010016085>
- Tulving, E. et Schacter, D. L. (1990). Priming and human memory systems. *Science*, 247(4940), 301-306. <http://doi.org/10.1126/science.2296719>
- Tversky, A. et Kahneman, D. (1973). Availability: A heuristic for judging frequency and probability. *Cognitive psychology*, 5(2), 207-232. [https://doi.org/10.1016/0010-0285\(73\)90033-9](https://doi.org/10.1016/0010-0285(73)90033-9)
- Ullsperger, M., Bylsma, L. M., et Botvinick, M. M. (2005). The conflict adaptation effect: It's not just priming. *Cognitive, Affective, & Behavioral Neuroscience*, 5(4), 467-472. <https://doi.org/10.3758/CABN.5.4.467>
- UNESCO (2021a). *Les sciences au service de la société*. UNESCO.
- UNESCO (2021b). *UNESCO-IBE : Curriculum et qualité des apprentissages : Quel apport des neurosciences?* [Webinaire]. Bureau international d'éducation.
- Uno, G. E. et Bybee, R. W. (1994). Understanding the dimensions of biological literacy. *BioScience*, 44(8), 553-557. <https://doi.org/10.2307/1312283>
- Valian, V. (2015). Bilingualism and cognition. *Bilingualism: language and cognition*, 18(1), 3-24. <https://doi.org/10.1017/S1366728914000522>
- van der Ven, S. H. G., Boom, J., Kroesbergen, E. H. et Leseman, P. P. M. (2012). Microgenetic patterns of children's multiplication learning: Confirming the overlapping waves model by latent growth

- modeling. *Journal of Experimental Child Psychology*, 113(1), 1-19.
<https://doi.org/10.1016/j.jecp.2012.02.001>
- van Merriënboer, J. J. G., Jelsma, O. et Paas, F. (1992). Training for reflective expertise: A four-component instructional design model for complex cognitive skills. *Educational Technology, Research and Development*, 40(2), 23-43.
- van Merriënboer, J. J. G. et Kirschner, P. A. (2018). 4C/ID in the context of instructional design and the learning sciences. Dans F. Fisher, C. E. Hmelo-Silver, S. R. Goldman et P. Reimann (éd.), *International handbook of the learning sciences* (p. 169-179). Routledge.
- van Merriënboer, J. J. G., Kirschner, P. A. et Kester, L. (2003). Taking the load off a learner's mind: Instructional design for complex learning. *Educational Psychologist*, 38(1), 5-13.
http://doi.org/10.1207/s15326985ep3801_2
- van Merriënboer, J. J. G. et Sweller, J. (2005). Cognitive load theory and complex learning: Recent developments and future directions. *Educational Psychology Review*, 17, 147–177.
<http://www.jstor.org/stable/23363899>
- van Snellenberg, J. X., Slifstein, M., Read, C., Weber, J., Thompson, J. L., Wager, T. D., Shohamy, D., Abi-Dargham, A. et Smith, E. E. (2015). Dynamic shifts in brain network activation during supracapacity working memory task performance. *Human Brain Mapping*, 36(4), 1245-1264.
<https://doi.org/10.1002/hbm.22699>
- van Veen, V. et Carter, C. S. (2002). The anterior cingulate as a conflict monitor: fMRI and ERP studies. *Physiology & Behavior*, 77(4-5), 477-482. [https://doi.org/10.1016/s0031-9384\(02\)00930-7](https://doi.org/10.1016/s0031-9384(02)00930-7)
- Vartanian, O., Beatty, E. L., Smith, I., Blackler, K., Lam, Q., Forbes, S. et De Neys, W. (2018). The reflective mind: Examining individual differences in susceptibility to base rate neglect with fmri. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 30(7), 1011-1022. https://doi.org/10.1162/jocn_a_01264-5
- Vaughn, A. R., Brown, R. D. et Johnson, M. L. (2020). Understanding conceptual change and science learning through educational neuroscience. *Mind, Brain, and Education*, 14(2), 82-93.
<https://doi.org/10.1111/mbe.12237>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2019.05.011>
- Viennot, L. (1979). Spontaneous reasoning in elementary dynamics. *European Journal of Science Education*, 1(2), 205-221. <https://doi.org/10.1080/0140528790010209>
- Villani, A. (1992). Conceptual change in science and science education. *Science Education*, 76(2), 223-237. <https://doi.org/10.1002/sce.3730760209>
- Vosniadou, S. (1994). Capturing and modeling the process of conceptual change. *Learning and Instruction*, 4(1), 45-69. [https://doi.org/10.1016/0959-4752\(94\)90018-3](https://doi.org/10.1016/0959-4752(94)90018-3)
- Vosniadou, S. (éd.). (2008). *International handbook of research on conceptual change*. Routledge.

- Vosniadou, S. (2020). *Students' Misconceptions and Science Education*. Oxford Research Encyclopedia of Education.
- Vosniadou, S., Pnevmatikos, D. et Makris, N. (2018a). The role of executive function in the construction and employment of scientific and mathematical concepts that require conceptual change learning. *Neuroeducation*, 5(2), 62-72. <https://doi.org/10.24046/neuroed.20180502.62>
- Vosniadou, S., Pnevmatikos, D., Makris, N., Lepenioti, D., Eikospentaki, K., Chountala, A. et Kyrianakis, G. (2018b). The recruitment of shifting and inhibition in on-line science and mathematics tasks. *Cognitive Science*, 42(6), 1860-1886. <https://doi.org/10.1111/cogs.12624>
- Wagner, A. et Boakes, R. A. (1979). Habituation and memory. Dans A. Dickinson et R. A. Boakes (éd.), *Mechanisms of Learning and Motivation: A Memorial Volume to Jerry Konorski* (p. 53-82). Psychology Press.
- Wandersee, J. H., Mintzes, J. J. et Novak, J. D. (1994). Research on alternative conceptions in science. Dans D. L. Gabel (éd.), *Handbook of research on science teaching and learning* (p. 177-210). Simon & Schuster and Prentice Hall International.
- Watts, T. W., Duncan, G. J. et Quan, H. (2018). Revisiting the Marshmallow Test: A conceptual Replication investigating links between early delay of gratification and later outcomes. *Psychological Science*, 29(7), 1159–1177. <https://doi-org/10.1177/0956797618761661>
- Weber, B. (2019, 23 septembre). La confiance des Canadiens envers la science s'érode, selon un sondage. *Le Devoir*. <https://www.ledevoir.com/societe/science/563217/la-confiance-des-canadiens-envers-la-science-s-erode-selon-un-sondage>
- Welford, A. T. (1980). Choice reaction time: Basic concepts. Dans A. T. Welford (éd.), *Reaction times* (p. 73-128). Academic Press.
- Wiebe, S. A., Sheffield, T., Nelson, J. M., Clark, C. A. C., Chevalier, N. et Espy, K. A. (2011). The structure of executive function in 3-year-olds. *Journal of Experimental Child Psychology*, 108(3), 436-452. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2010.08.008>
- Wilensky, U. et Resnick, M. (1998). *Thinking in levels: A dynamic systems approach to making sense of the world*, 8(1), 3-19.
- Wilkinson, H. R., Smid, C., Morris, S., Farran, E. K., Dumontheil, I., Mayer, S., Tolmie, A., Bell, D., Porayska-Pomsta, K., Holmes, W., Mareschal, D. et Thomas, M. S. C. (2019). Domain-specific inhibitory control training to improve children's learning of counterintuitive concepts in mathematics and science. *Journal of Cognitive Enhancement*, 4(3), 296-314. <https://doi.org/10.1007/s41465-019-00161-4>
- Willoughby, M. T., Blair, C. B., Wirth, R. J. et Greenberg, M. (2012). The measurement of executive function at age 5: Psychometric properties and relationship to academic achievement. *Psychological Assessment*, 24(1), 226-239. <https://doi.org/10.1037/a0025361>
- Wright, C. I., McMullin, K., Martis, B., Fischer, H. et Rauch, S. L. (2005). Brain correlates of negative visuospatial priming in healthy children. *Psychiatry Research: Neuroimaging*, 139(1), 41-52.

<https://doi.org/10.1016/j.pscychresns.2005.03.001>

- Wright, C. I., Waterman, M., Prescott, H. et Murdoch-Eaton, D. (2003). A new Stroop-like measure of inhibitory function development: typical developmental trends. *Journal of Child Psychology and Psychiatry*, 44(4), 561-575. <https://doi.org/10.1111/1469-7610.00145>
- Yaple, Z. et Arsalidou, M. (2017). Negative priming: A meta-analysis of fmri studies. *Experimental Brain Research*, 235(11), 3367–3374. <https://doi.org/10.1007/s00221-017-5065-6>
- Yoon, H.-G. et Kim, B.-S. (2016). Preservice elementary teachers' beliefs about nature of science and constructivist teaching in the content-specific context. *EURASIA Journal of Mathematics, Science and Technology Education*, 12(3). <https://doi.org/10.12973/eurasia.2016.1210a>
- Zaitchik, D., Iqbal, Y. et Carey, S. (2014). The effect of executive function on biological reasoning in young children: An individual differences study. *Child Development*, 85(1), 160-175. <https://doi.org/10.1111/cdev.12145>
- Zaitchik, D. et Solomon, G. E. A. (2008). Animist thinking in the elderly and in patients with Alzheimer's disease. *Cognitive Neuropsychology*, 25(1), 27-37. <https://doi.org/10.1080/02643290801904059>
- Zajonc, R. B. (1968). Attitudinal effects of mere exposure. *Journal of Personality and Social Psychology*, 9(2, Pt.2), 1-27. <https://doi.org/10.1037/h0025848>
- Zelazo, P. D., Blair, C. B. et Willoughby, M. T. (2016). *Executive Function: Implications for Education*. NCER 2017-2000. National Center for Education Research.
- Zeki, S. (1993). *A Vision of the Brain*. Blackwell Scientific Publications.
- Zhu, Y., Zhang, L., Leng, Y., Pang, R. et Wang, X. (2019). Event-related potential evidence for persistence of an intuitive misconception about electricity. *Mind, Brain, and Education*, 13(2), 80-91. <https://doi.org/10.1111/mbe.12188>