

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL

EFFETS D'ENTRAÎNEMENTS VISANT LE DÉVELOPPEMENT DES
FONCTIONS EXÉCUTIVES CHEZ LES ENFANTS ET LES ADOLESCENTS:
UNE MÉTA-ANALYSE

MÉMOIRE
PRÉSENTÉ
COMME EXIGENCE PARTIELLE
DE LA MAÎTRISE EN ÉDUCATION

PAR
SOPHIE McMULLIN

AOÛT 2022

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

Une maîtrise, c'est beaucoup de travail en solitaire. Peu importe notre tolérance à la solitude, vient un temps où nous avons besoin de partager, de communiquer, d'échanger, pour ne pas ruminer les mêmes idées, pour ne pas nous laisser envahir par l'inquiétude, pour trouver l'envie d'avancer. Dans ces moments-là, être soutenu·e par une équipe fait toute la différence. Ce n'est pas tant une question de socialisation ou de décompression, c'est plutôt une question de motivation. Garder le cap ou mettre à jour ses objectifs demande par moments d'être accompagné·e. Je pense que sans mes collègues de bureau, sans les membres de mon équipe de recherche, étudiants comme professeurs, sans mon directeur de recherche, ce mémoire serait demeuré inachevé pour de mauvaises raisons. Nous sommes tous capables de finir un mémoire. Mais parfois nous perdons de vue les raisons initiales de notre choix et pensons pénible, vain, inutile de continuer. La bienveillance et l'intérêt constants de mon entourage au Laboratoire de recherche en neuroéducation m'ont soutenue et encouragée à aller jusqu'au bout quand je n'y croyais plus. Jérémie, Alexandra, Lucian, Élisabeth, Geneviève, Lorie, Steve, un immense merci. Vos esprits affûtés et généreux sont un plaisir à côtoyer.

Il va sans dire que l'entourage personnel est tout aussi crucial. Tony, après tant d'années, je demeure étonnée de ton soutien inconditionnel. Je ne sais pas ce que je ferai demain, mais cela ne m'inquiète pas, car je sais que tu me soutiendras.

DÉDICACE

À Hannah,
parce que tout est venu de toi,
et, ultimement, tout est pour toi.

AVANT-PROPOS

La présente recherche est née d'une envie, d'un besoin de mon directeur et moi-même, d'explorer les non-dits dans les entraînements cognitifs pour y trouver des pistes de réflexion. Les fonctions exécutives sont au cœur du fonctionnement humain, ce qui les met au premier plan dans le cadre des apprentissages. Peut-on les travailler? Quel est leur potentiel d'amélioration? À quel âge une intervention est la plus pertinente? Quand le cerveau est en plein développement? Ou plutôt quand il approche la maturité? Le constat répandu que ces entraînements cognitifs sont assez inefficaces cachait selon nous un potentiel si l'on acceptait que ces entraînements n'étaient pas une panacée qui allait enrayer toutes les difficultés d'apprentissage. Il s'agissait plutôt de faire ressortir les points positifs, car ils signifiaient une possibilité d'amélioration, une piste de travail à proposer aux enseignants et éducateurs. Renforcer les fonctions exécutives pour s'appuyer plus adéquatement dessus en éducation, tel est le leitmotiv qui a guidé notre travail dans cette recherche.

Le contenu présenté dans les pages qui suivent n'est qu'un petit pas dans ce sens, mais il nous semblait indispensable : adopter une perspective nouvelle sur les entraînements cognitifs pour faire émerger des réflexions sur leur potentiel.

TABLES DES MATIÈRES

AVANT-PROPOS	iv
LISTE DES FIGURES.....	viii
LISTE DES TABLEAUX.....	ix
LISTE DES ABRÉVIATIONS, DES SIGLES ET DES ACRONYMES	xi
RÉSUMÉ.....	xii
INTRODUCTION.....	1
CHAPITRE I PROBLÉMATIQUE	3
1.1 Rôle des fonctions exécutives dans l'apprentissage	3
1.1.1 Fonctions exécutives	4
1.1.2 Liens entre les fonctions exécutives et la réussite académique.....	6
1.2 Problèmes liés à des fonctions exécutives peu efficaces ou moins performantes 10	
1.2.1 Difficultés en mémoire de travail.....	11
1.2.2 Difficultés au niveau du contrôle inhibiteur.....	12
1.2.3 Difficultés au niveau de la flexibilité cognitive	15
1.3 Entraînements cognitifs, une avenue intéressante pour favoriser la réussite scolaire ?.....	15
1.4 Limites de la littérature sur les entraînements cognitifs pour trancher sur leur pertinence	20
1.4.1 Inconsistance des résultats, voire doutes sérieux sur l'efficacité	20
1.4.2 Effets des entraînements de l'inhibition peu documentés et évaluation de l'efficacité en fonction de différents niveaux de transfert	22
1.5 Enjeux liés à ce problème scientifique	25
1.5.1 Considérations liées à la population ciblée par l'entraînement.....	25

1.5.2	Considérations liées au degré de transfert réellement obtenu.....	27
1.6	Question de recherche.....	29
CHAPITRE II CADRE THÉORIQUE		31
2.1	Fonctions exécutives.....	31
2.1.1	Identification et définition des fonctions exécutives de base.....	32
2.1.2	Différentes organisations des fonctions exécutives	43
2.1.3	Évaluations et entraînements des fonctions exécutives	55
2.2	Transfert d'apprentissage.....	63
2.2.1	Définition du transfert d'apprentissage.....	63
2.2.2	Rareté d'observation empirique du transfert d'apprentissage.....	67
2.2.3	Opérationnalisations variées du transfert d'apprentissage	71
2.2.4	Typologie du transfert d'apprentissage.....	76
2.2.5	Opérationnalisation du transfert d'apprentissage retenue et justification.....	81
2.3	Hypothèses de recherche	84
CHAPITRE III MÉTHODOLOGIE		88
3.1	Choix de la méthode	88
3.2	Source des données.....	90
3.3	Codage des données extraites des études collectées.....	103
3.4	Analyses réalisées.....	108
3.4.1	Calcul des tailles d'effet.....	108
3.4.2	Traitement des valeurs aberrantes.....	111
3.4.3	Traitement de la dépendance des mesures	111
3.4.4	Calcul de scores de transfert globaux.....	112
3.4.5	Comparaison des tailles d'effet selon les variables d'intérêts	115
3.4.6	Recherche d'interactions entre les variables d'intérêt	115
CHAPITRE IV RÉSULTATS		116
4.1	Analyse des variables d'intérêt.....	116
4.2	Interactions entre certaines variables d'intérêt	121
4.3	Transfert.....	127
4.3.1	Reproduction de la dichotomie transfert proche – transfert éloigné	127
4.3.2	Portrait du transfert variable par variable.....	127
4.3.3	Portrait du transfert synthétisé	130

CHAPITRE V DISCUSSION.....	132
5.1 Reproduction de la distinction transfert proche-transfert éloigné	132
5.2 Variables modératrices potentielles de l'efficacité des entraînements cognitifs 133	
5.2.1 Âge	133
5.2.2 Type d'entraînement	135
5.2.3 Caractéristiques des entraînements	137
5.3 FE et compétences s'améliorant le plus.....	139
5.4 Interactions avec l'âge	142
5.4.1 Croisement de l'âge et du type d'entraînement.....	143
5.4.2 Croisement de l'âge et la FE	144
5.6 Étude du transfert selon une méthodologie exploratoire	147
5.6.1 Portrait global.....	147
5.6.2 Variables de contexte du transfert qui ressortent	149
5.6.3 Particularités liées au transfert de contenu.....	151
5.6.4 Parallèle entre les degrés de transfert et la dichotomie transfert proche – transfert éloigné.....	153
5.6.5 Interprétations renforcées par les scores de transfert	154
5.6.6 Absence de facteurs facilitants ou limitatifs du transfert	157
5.7 Apport de cette étude quant au transfert	159
5.8 Limites	161
5.9 Conclusion	162
RÉFÉRENCES.....	164

LISTE DES FIGURES

Figure	Page
2.1 Représentation schématique de l'organisation à trois FE indépendantes par rapport au modèle unité-diversité de Miyake et Friedman (2012). Adapté de « Individual differences in executive functions », par Miyake, A. et Friedman, N. P., 2012, <i>Current Directions in Psychological Sciences</i> , 21(1), p. 11.....	48
2.2 Réseau conceptuel des différents degrés de transfert d'apprentissage d'après les typologies de Butterfield et Nelson (1991), Perkins et Salomon (1992) et Haskell (2001).	74
2.3 Diagramme de l'opérationnalisation des facteurs contextuels du transfert de Barnett et Ceci (2002). Adapté de « When and where do we apply what we learn? A taxonomy for far transfer », par Barnett, S. M. et Ceci, S. J., 2002, <i>Psychological Bulletin</i> , 128(4), p. 628.	82
3.1 Diagramme illustrant les étapes de sélection des études. Adapté de « Preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses: The PRISMA statement », par Moher, D., Liberati, A., Tetzlaff, J., Altman, D. G. pour le groupe PRISMA, 2009, <i>BMJ</i> , 339, b2535.....	97
4.1 Répartition des tailles d'effet g pour chaque type d'entraînement en fonction de la tranche d'âge.....	121
4.2 Répartition des tailles d'effet g pour chaque type de compétence évaluée en fonction de la tranche d'âge.....	126

LISTE DES TABLEAUX

Tableau	Page
2.1 Typologie du transfert éloigné de Barnett et Ceci (2002)	77
2.2 Typologie du transfert éloigné de Barnett et Ceci (2002) : le contenu transféré	78
2.3 Typologie du transfert éloigné de Barnett et Ceci (2002) : le contexte du transfert, illustrations	79
3.1 Algorithme de recherche bibliographique en anglais développé pour la méta-analyse	92
3.2 Liste des études retenues pour la méta-analyse	99
3.3 Tableau de codage des données bibliographiques	102
3.4 Tableau de codage du protocole expérimental	103
3.5 Tableau de codage de l'entraînement	104
3.6 Tableau de codage du transfert	106
3.7 Tableau de codage des données statistiques	107
4.1 Synthèse des résultats pour les variables catégorielles liées aux entraînements.....	118
4.2 Synthèse des résultats d'analyses pour les variables du transfert.....	126

5.1 Hypothèses et questions exploratoires et leurs conclusions 159

LISTE DES ABRÉVIATIONS, DES SIGLES ET DES ACRONYMES

FE Fonctions exécutives

CI Contrôle inhibiteur

FC Flexibilité cognitive

MDT Mémoire de travail

RÉSUMÉ

La recherche proposée avait pour but d'affiner le portrait des types de transfert obtenus à la suite d'un entraînement cognitif chez des enfants et adolescents. Ces entraînements ont pour ambition de soutenir les fonctions exécutives (Diamond, 2016), ces processus cognitifs supérieurs de contrôle général qui assurent une certaine cohésion dans les comportements afin notamment d'atteindre un but (Miyake *et al.*, 2000). Cependant, l'efficacité de ces entraînements est contestée dans la mesure où ils ne produisent généralement pas de transfert dit éloigné (Sala et Gobet, 2017), c'est-à-dire entre deux tâches totalement différentes. Les études dans ce domaine ont tendance à utiliser le transfert éloigné comme mesure étalon de l'efficacité desdits entraînements (Barnett et Ceci, 2002), bien que plusieurs conceptualisations du transfert en proposent différents types (Haskell, 2001). En tenant compte de cette variété de transferts dans l'interprétation des effets des entraînements cognitifs, peut-être les entraînements cognitifs offriraient-ils un portrait différent de leurs effets. De plus, ce portrait pourrait être influencé par divers facteurs, particulièrement l'âge des participants, la forme de l'entraînement ou la fonction exécutive ciblée, menant à une diversité de portraits selon les contextes. Afin d'explorer ces questions, une méta-analyse a été réalisée, en s'appuyant sur les travaux de Barnett et Ceci (2002) pour coder les variables liées au transfert. Les analyses, utilisant le modèle hiérarchique corrélé (Pustejovsky et Tipton, 2022), ont montré que la mémoire de travail, et particulièrement au primaire, semble le plus bénéficier d'un entraînement, surtout lorsqu'il est direct et ponctuel. Par ailleurs, les analyses liées au transfert n'ont pas permis de dégager de niveaux de transfert plus fins que ceux existants. Cependant, il semble qu'un délai trop long avant l'évaluation et un changement trop grand dans le contexte social nuisent au transfert

d'apprentissage. En somme, bien que toutes les hypothèses n'aient pas été validées, plusieurs résultats intéressants ont été dégagés, offrant des pistes de recherche futures.

Mots clés : fonction exécutive, entraînement cognitif, transfert, enfants, méta-analyse

INTRODUCTION

La capacité à apprendre dépend en partie de processus cognitifs généraux qui permettent les comportements contrôlés et orientés vers un but, les fonctions exécutives (FE). Ainsi, plusieurs liens ont été établis entre le niveau d'efficacité des FE et la réussite scolaire. En conséquence, il semble intéressant de chercher à renforcer voire améliorer les FE pour favoriser la réussite des élèves. Cela explique le dynamisme de la recherche en entraînements cognitifs, littéralement le développement de programmes d'entraînements des FE. Un problème persistant, cependant, est l'inconsistance des résultats d'une étude à l'autre, et plus encore le faible potentiel de transfert des bénéfices des entraînements à de nouvelles tâches. Cela a mené à remettre en question la pertinence de ces programmes. Pourtant, ces interprétations des résultats négligent souvent les multiples niveaux de transfert et se focalisent sur un transfert dit éloigné, donc entre des tâches, des compétences, des processus très différents. Une des raisons de cette négligence est la taille relativement petite des échantillons utilisés dans les recherches expérimentales, limitant la possibilité d'explorer de nombreux niveaux de transfert. Par ailleurs, la multiplicité de variables en jeu dans l'élaboration de programmes d'entraînements devrait inciter à poser des conclusions différenciées selon les variables testées, selon les caractéristiques des entraînements, surtout la population ciblée et le type d'entraînement. C'est pourquoi il a été choisi de procéder à une méta-analyse qui tienne compte des variables en jeu dans les recherches expérimentales en distinguant les différents niveaux de transfert selon une typologie détaillée et appliquée systématiquement. Cela vise à dégager des conclusions plus précises quant au potentiel des entraînements cognitifs et à leur pertinence auprès des enfants et des adolescents. Ces éléments seront explorés dans le texte qui suit. Le premier chapitre permettra de comprendre les liens entre les FE et l'apprentissage ainsi que d'exposer l'état de la

recherche sur les entraînements cognitifs. Le deuxième chapitre aura pour but d'expliquer de façon détaillée ce que sont les FE et le transfert d'apprentissage. Suivra l'explicitation du choix méthodologique de la méta-analyse et sa mise en œuvre dans le troisième chapitre. Le chapitre quatre décrira les résultats obtenus grâce à la méta-analyse, alors que le cinquième et dernier chapitre permettra de les interpréter.

CHAPITRE I

PROBLÉMATIQUE

Ce premier chapitre présente un facteur intrinsèque lié à la réussite scolaire : les FE. Ce sont des processus cognitifs généraux permettant les comportements contrôlés et orientés vers un but. Leur niveau d'efficacité est lié à la réussite scolaire, car les FE sont impliqués dans les apprentissages directement et indirectement. C'est pourquoi de nombreux programmes d'amélioration des FE, ou entraînements cognitifs, ont été élaborés. Cependant, leur utilité est contestée, notamment parce que les améliorations sont souvent limitées aux tâches très semblables à celles entraînées. Plutôt, les améliorations ne sont pas observées dans des tâches très éloignées de celles entraînées, faisant conclure à l'impossibilité d'améliorer les FE. Pourtant, cette conclusion ignore la variété des niveaux de transfert d'entraînement. Ce dernier élément mène au constat que subsiste une incertitude quant à l'efficacité des entraînements cognitifs.

1.1 Rôle des fonctions exécutives dans l'apprentissage

Pendant leur scolarité, les élèves doivent constamment recourir à un ensemble de compétences cognitives de haut niveau comme l'attention, l'autocontrôle, le traitement de l'information en mémoire de travail, etc. (Diamond, 2013). La recherche montre que des retards dans le développement de ces compétences générales sont liés à de plus grands risques d'échecs précoces qui tendent à se maintenir à travers la scolarité (p. ex., Duncan *et al.*, 2007 ; McGee *et al.*, 2002). À l'inverse, il existe une corrélation positive entre le développement de ces compétences et les performances académiques (Allan *et*

al., 2014). Au préscolaire par exemple, les enfants avec les meilleures capacités d'autocontrôle réalisent en moyenne de meilleures performances dans les tâches académiques (Allan *et al.*, 2014). Autrement dit, pour réussir, il faudrait parvenir à développer, et le plus tôt possible, des habiletés cognitives permettant de soutenir les tâches académiques (Allan *et al.*, 2014 ; Diamond, 2016 ; Duncan *et al.*, 2007), comme la concentration, l'attention, la créativité, la flexibilité, la discipline et l'autocontrôle (Cartwright, 2012 ; Diamond, 2016). Ces habiletés ont un point commun : les processus cognitifs qui les sous-tendent (Blair et Diamond, 2008 ; Blair et Razza, 2007 ; Sikora *et al.*, 2002 ; van der Sluis *et al.*, 2007), aussi appelés FE. Qu'il s'agisse de la créativité, de la flexibilité ou de l'autocontrôle, les FE sont « centrales à toutes ces compétences » (Diamond, 2016), car elles permettent, par exemple, de ne pas répondre impulsivement, de résister aux distractions, de rester concentré, de changer de perspective ou de jongler mentalement avec des idées (Diamond, 2016).

1.1.1 Fonctions exécutives

Les FE sont des processus cognitifs généraux impliqués dans la coordination et le contrôle des comportements orientés vers un but (Friedman et Miyake, 2017 ; Titz et Karbach, 2014). Le concept de FE englobe des processus cognitifs tels que la mémoire de travail, le contrôle inhibiteur, la flexibilité cognitive, la planification et la résolution de problèmes. La mémoire de travail, le contrôle inhibiteur et la flexibilité cognitive sont cependant les plus communément admis dans les modèles neuropsychologiques développementaux (Diamond, 2013 ; Titz et Karbach, 2014). Ces trois processus seraient indispensables dans les tâches scolaires, très souvent de façon combinée. La mémoire de travail permet de garder présentes à l'esprit un certain nombre d'informations pour un temps limité, afin de manipuler ces informations, comme en supprimer, en ajouter, en combiner, afin de réaliser une tâche (Alloway et Copello, 2013 ; Cartwright, 2012 ; Diamond, 2013). Par exemple, un élève qui doit recopier du contenu inscrit au tableau recourt à sa mémoire de travail : il mémorise temporairement

les mots à recopier, puis passe à l'action d'écrire précisément les mots retenus, pour ensuite en mémoriser d'autres, etc. (Alloway et Copello, 2013). C'est encore le cas dans la lecture (Sweller, 1994) : il faut mémoriser temporairement chacun des mots décodés, extraire de notre mémoire leur signification, et les assembler en un tout cohérent afin de dégager un sens à chacune des phrases lues (Bauer et Varga, 2016).

Le contrôle inhibiteur, pour sa part, est la capacité de contrôler ses réponses habituelles, automatiques, prépondérantes afin de favoriser des réponses plus appropriées pour la tâche en cours (Cartwright, 2012 ; Diamond, 2013). Au niveau comportemental, c'est le contrôle inhibiteur qui permet d'apprendre à lever la main avant de parler en contexte de groupe. Au niveau de l'utilisation des connaissances, c'est le contrôle inhibiteur qui permet de recourir au bon savoir scientifique plutôt qu'à notre intuition quand il faut déterminer combien de fils électriques sont nécessaires pour allumer une ampoule (Masson *et al.*, 2014).

Enfin, la flexibilité cognitive est la capacité de considérer et alterner entre plusieurs éléments d'information pour réaliser une tâche, mais aussi la capacité de changer de perspective (Cartwright, 2012 ; Diamond, 2013). La flexibilité cognitive permettrait notamment aux élèves d'utiliser la rétroaction négative qu'ils ont reçue pour ajuster leurs réponses (Diamond, 2013 ; Magalhães *et al.*, 2020).

Il est important de préciser que chacune de ces FE agit de façon conjointe avec d'autres processus cognitifs et FE (Diamond, 2013). Les activités de la vie courante comme les situations d'apprentissages mobilisent plusieurs processus cognitifs. Par exemple, l'élève qui doit lire un texte à haute voix en classe utilise sa mémoire de travail pour décoder l'écrit, son contrôle inhibiteur pour bloquer les informations non pertinentes à sa tâche comme les bruits ambiants, et sa flexibilité cognitive pour prendre en compte les corrections de l'enseignant·e. Bien qu'il soit souvent fait mention d'une FE dans

une tâche, il s'agit en fait de la FE mobilisée de façon prépondérante dans ladite tâche, mais pas l'unique FE utilisée.

Ainsi, les processus cognitifs généraux permettent les comportements volontaires et contrôlés. La mémoire de travail, le contrôle inhibiteur et la flexibilité cognitive sont impliqués dans les apprentissages et le développement en général.

1.1.2 Liens entre les fonctions exécutives et la réussite académique

L'importance des FE dans les apprentissages a été soulignée à travers de nombreuses recherches et différents angles d'étude. Il est d'abord possible de mentionner que le niveau des FE serait plus déterminant du niveau de préparation à entrer à l'école que le quotient intellectuel ou les compétences en lecture ou en mathématiques à l'entrée à l'école (Blair, 2002 ; Blair et Razza, 2007 ; Normandeau et Guay, 1998). Autrement dit, le niveau des FE serait un indice efficace pour savoir si un élève est prêt à entrer à l'école. Confortant ce constat, Monette et ses collaborateurs (2011) ont observé que les habiletés en mathématiques, lecture et écriture à la fin de la 1^e année du primaire étaient positivement corrélées avec les niveaux de performance des FE au préscolaire. En somme, avoir des FE plus efficaces lors de l'entrée à l'école faciliterait le développement des compétences intrinsèques à l'activité d'élève, telles que l'autocontrôle, la flexibilité ou l'attention, nécessaires à la réussite scolaire (Allan *et al.*, 2014; Blair, 2002).

Plus largement, des recherches ont montré qu'il y a une corrélation positive générale entre les FE et les performances scolaires (Blair et Razza, 2007 ; Bull et Scerif, 2001 ; Willoughby *et al.*, 2012). Ainsi, à divers points du parcours scolaire, des FE plus efficaces seraient associées à des résultats accrus (p. ex., Blair et Razza, 2007; Nguyen et Duncan, 2017). Les études longitudinales ajoutent que la direction du lien serait des FE vers la réussite académique (Best *et al.*, 2011). Ainsi, les enfants dont les FE sont les mieux développées auraient de meilleurs résultats scolaires, le développement de

FE efficaces précédant la réussite académique. Isolément, il a été montré par plusieurs recherches que chaque FE aurait une part de variance unique dans l'explication du lien FE-performances académiques. L'efficacité de la flexibilité cognitive serait associée positivement avec les performances académiques en général de la seconde partie du cycle primaire, même après avoir contrôlé pour la part de variance revenant à l'intelligence fluide, c'est-à-dire la capacité de résoudre des problèmes indépendamment des connaissances acquises (Cattell, 1963), au contrôle inhibiteur et à la mémoire de travail (Magalhães *et al.*, 2020). Au secondaire, la flexibilité cognitive serait associée à des performances supérieures à la moyenne en mathématiques (Abreu-Mendoza *et al.*, 2018). Au primaire, ce serait en lecture (Arán Filippetti et Krumm, 2020 ; Latzman *et al.*, 2010 ; Yeniad *et al.*, 2013) et en écriture (Arán Filippetti et Krumm, 2020) en plus des mathématiques (Bull et Scerif, 2001 ; Stad *et al.*, 2018). Un contrôle inhibiteur et une mémoire de travail plus développés au préscolaire seraient associés à des performances supérieures dans les compétences émergentes en mathématiques et en lecture (connaissance des lettres et conscience phonologique ; Blair et Razza, 2007 ; Espy *et al.*, 2008), à la fois dans les milieux défavorisés (Blair et Razza, 2007) et ceux plus favorisés (Espy *et al.*, 2004). Pour Espy et ses collaborateurs (2004), le contrôle inhibiteur et la mémoire de travail « contribuent de manière substantielle aux performances en mathématiques » chez les enfants d'âge préscolaire. Le contrôle inhibiteur serait responsable de 12 % de la variance de la relation avec les performances en mathématiques après avoir contrôlé pour différentes variables telles que l'éducation de la mère, l'âge de l'enfant et l'intelligence verbale de l'enfant, et éliminé l'influence de la mémoire de travail et de la flexibilité cognitive (Espy *et al.*, 2004). Au primaire aussi les chercheurs trouvent une contribution unique de la mémoire de travail aux performances en mathématiques (Titz et Karbach, 2014), particulièrement en résolution de problèmes (Raghubar *et al.*, 2010), et à la lecture de textes (Peng *et al.*, 2018), autant au niveau du mot que de la fluidité et de la compréhension, après avoir enlevé la contribution des habiletés de base en lecture et de la vitesse de traitement (Jacobson *et al.*, 2017). Ce lien entre l'efficacité des FE et

les performances académiques, en général ou dans des disciplines prises isolément, tend à se maintenir à travers la scolarité (Altemeier *et al.*, 2006 ; Blums *et al.*, 2017 ; Bull *et al.*, 2008 ; Gathercole et Pickering, 2000 ; George et Greenfield, 2005 ; Hitch, Towse et Hutton, 2001 ; St Clair-Thompson et Gathercole, 2006 ; Stipek et Valentino, 2015 ; van der Sluis *et al.*, 2007). En somme, les enfants ayant des FE mieux développées à un âge donné seraient plus susceptibles de vivre plus de réussites sur le plan scolaire.

Les résultats de recherche vont plus loin, car plusieurs études ont montré que les FE seraient aussi de bons prédicteurs de la réussite académique, c'est-à-dire que leur niveau en début de scolarité constitue un indice de la réussite scolaire des années plus tard (p. ex., Ahmed *et al.*, 2018 ; Alloway et Alloway, 2010 ; Bull et Lee, 2014 ; Escolano-Pérez *et al.*, 2017 ; Espy *et al.*, 2004 ; Latzman *et al.*, 2010 ; Morgan *et al.*, 2019 ; Sulik *et al.*, 2018 ; Simanowski et Krajewski, 2019 ; Siquara *et al.*, 2018 ; Viterbori *et al.*, 2015). Le pouvoir prédicteur du niveau des FE en début de scolarité sur la réussite ultérieure serait ainsi supérieur à celui des habiletés de base dans les différentes disciplines scolaires, notamment en lecture et en mathématiques (Korpipää *et al.*, 2019). Autrement dit, avoir des FE plus développées à un jeune âge pourrait prédire des performances académiques plus élevées ultérieurement, de façon plus certaine que le niveau en lecture ou en mathématiques. Par exemple, le niveau de la mémoire de travail à 4 ans s'est avéré prédicteur de la réussite scolaire générale à 15 ans, même en contrôlant pour plusieurs variables sociodémographiques (Ahmed *et al.*, 2018). D'autres équipes de recherche ont observé un caractère prédicteur des FE sur des résultats dans des disciplines particulières : du contrôle inhibiteur sur les performances en mathématiques au préscolaire (Espy *et al.*, 2004) et à la fin du primaire (St Clair-Thompson et Gathercole, 2006), de la mémoire de travail sur les performances en lecture indépendamment de la conscience phonologique (Swanson et Beebe-Frankenberger, 2004), de la mémoire de travail sur les performances en mathématiques (Gashaj *et al.*, 2019), ou encore de la flexibilité cognitive sur les performances en

mathématiques et en lecture chez les enfants de 4 à 13 ans (Yeniad *et al.*, 2013). Certaines études trouvent cependant un effet indirect sur les performances académiques (Gashaj *et al.*, 2019 ; Simanowski et Krajewski, 2019), suggérant que potentiellement les FE prédiraient le développement des compétences de base, comme la mémoire de travail pour la compréhension du concept de nombre (Simanowski et Krajewski, 2019) ou les compétences numériques de base (Kroesbergen *et al.*, 2009), qui à leur tour prédiraient les performances académiques.

L'idée que, éventuellement, les FE prédisent les performances académiques de façon indirecte paraît cohérente avec certains résultats de recherche qui trouvent une contribution unique des FE sur des compétences bien précises. En lecture par exemple, une mémoire de travail plus efficace serait associée à une fluidité accrue (Landerl et Wimmer, 2008), suggérant que la mémoire de travail est nécessaire pour développer cette fluidité. D'ailleurs, la pratique de la lecture repose en grande partie sur la mémoire de travail (Diamond, 2013). Elle permettrait de garder présents à l'esprit, pour un temps limité, les lettres et graphèmes décodés et convertis en phonèmes et de les manipuler pour former des mots, puis des phrases, afin de dégager un sens de ce qui a été lu. Ainsi, une mémoire de travail plus efficace assurerait une rétention supérieure et une manipulation facilitée des éléments décodés, ce qui mènerait à la fluidité. Ce rôle de la mémoire de travail serait surtout lors de la lecture de mots plurisyllabiques ou de phrases : Preßler et ses collaborateurs (2013) ont observé que, dans les premiers apprentissages de la lecture, la mémoire de travail aurait un rôle mineur, à la différence de la conscience phonologique. Titz et Karbach (2014), reprenant un argument de de Jong (2006), expliquent ce résultat par l'utilisation de mots monosyllabiques dans les premiers stades de la lecture. Or, de tels mots demandent peu de stockage, donc peu de charge en mémoire de travail. Cela expliquerait que les différences entre les apprenants quant à leurs capacités en mémoire de travail n'aient pas d'impacts sur les premiers apprentissages de la lecture. Cependant, il en serait autrement lorsqu'il s'agit de décoder des mots plus longs ou des phrases : les capacités en mémoire de travail

deviendraient alors plus déterminantes pour développer sa compétence en lecture, pour atteindre une certaine fluidité, car il faut alors stocker plusieurs phonèmes avant de former un mot (Landerl et Wimmer, 2008). Autrement dit, avoir une bonne capacité de stockage en mémoire de travail ne serait pas un facilitateur de l'apprentissage de la lecture dans ses premiers stades, mais le serait dès que les enfants doivent lire des mots de plus d'une syllabe.

Ainsi, il n'est pas clair si l'impact des FE sur les performances académiques est direct ou indirect. Cette nuance a son importance pour comprendre le rôle exact des FE dans les apprentissages scolaires. Cependant, dans les deux cas, la conclusion semble la même : directement ou indirectement le niveau des FE semble permettre de prédire les performances à l'école.

Il ressort de cet exposé que les FE, ces processus cognitifs qui permettent l'attention, l'autocontrôle ou la concentration, sont fortement liées à la réussite scolaire. Un bon niveau de développement des FE semble associé au niveau de préparation à entrer à l'école et à recevoir un enseignement formel. Pendant la scolarité, des FE davantage développées seraient associées à des résultats supérieurs. En somme, des FE mieux développées au début de la scolarité seraient de bons prédicteurs de la réussite académique globale, c'est-à-dire à la fin de la scolarité. Les FE semblent donc avoir un certain rôle dans la facilitation des apprentissages.

1.2 Problèmes liés à des fonctions exécutives peu efficaces ou moins performantes

Si les FE ont été associées positivement aux performances scolaires, des études ont aussi observé que des difficultés spécifiques au niveau des FE sont associées à des performances moindres à l'école (Alloway et Copello, 2013 ; Wilkey *et al.*, 2018). Les études font aussi ressortir les autres domaines affectés par les difficultés au niveau des FE.

1.2.1 Difficultés en mémoire de travail

De façon récurrente, les difficultés en mathématiques (Abreu-Mendoza *et al.*, 2018; Bull et Lee, 2014; Bull et Scerif, 2001; Geary, 2004; Lee et Bull, 2016; Peng *et al.*, 2012; Alloway et Passolunghi, 2011) et en lecture (Carretti *et al.*, 2009; Swanson *et al.*, 2009; Wang et Gathercole, 2013) ont été associées avec des problèmes de mémoire de travail. Abreu-Mendoza et ses collaborateurs (2018) relèvent cependant que ce constat est propre aux élèves en difficulté, c'est-à-dire que les élèves qui n'avaient pas de difficultés en mathématiques n'avaient pas nécessairement une mémoire de travail plus efficace. Cela semble suggérer que le lien difficultés académiques-FE moins efficaces devrait être isolé et analysé pour lui-même.

Plusieurs recherches se sont intéressées aux circonstances où la mémoire de travail est moins efficace dans des populations neurologiquement typiques, c'est-à-dire les personnes n'ayant pas de trouble neurologique développemental ou dégénératif. Il a ainsi été observé qu'une surcharge cognitive rend la mémoire de travail inopérante (Van Snellenberg *et al.*, 2015). Concrètement, et de façon légèrement simplifiée, lorsque trop d'informations doivent être traitées en même temps, la mémoire de travail, dont la capacité de traitement est limitée (Cowan, 2000 ; Miller, 1956), cesserait de fonctionner efficacement — une partie des informations n'étant alors pas traitée. La surcharge cognitive peut être le fait de différents facteurs, comme l'environnement, les émotions, la quantité d'informations transmises (Sweller *et al.*, 2019), mais serait aussi conditionnée par la capacité, propre à chacun, de la mémoire de travail.

En continuité avec ces propos, des difficultés au niveau de la mémoire de travail ont été associées avec de moindres performances scolaires (Alloway *et al.*, 2010). Alloway et Copello (2013) mentionnent que lorsque des élèves ont des difficultés en mémoire de travail, les problèmes se manifestent aussi dans le comportement en classe et face aux apprentissages. Les chercheurs ont ainsi observé que ces élèves oublient plus fréquemment les instructions au moment de les mettre en pratique, qu'ils ont de la

difficulté à retenir de l'information en même temps qu'ils doivent la manipuler, qu'ils s'égarer dans les tâches complexes, les menant fréquemment à abandonner les tâches en cours de route. Plusieurs auteurs font un lien avec les exigences en classe où il est attendu des élèves qu'ils soient attentifs et gardent présentes à l'esprit plusieurs informations (règles, consignes) tout en réalisant des tâches cognitivement exigeantes (Ahmed *et al.*, 2018 ; Alloway et Copello, 2013 ; Engel de Abreu *et al.*, 2014). La mémoire de travail étant la capacité à maintenir des informations présentes à l'esprit et à les utiliser pour réaliser une tâche (Diamond, 2013), les contextes multipliant les informations favoriseraient une surcharge de la mémoire de travail, *a fortiori* lorsque celle-ci est moins efficace. Ces études et d'autres (p. ex., Carretti *et al.*, 2009) suggèrent que la source de certaines difficultés académiques est à rechercher du côté de déficits exécutifs centraux non spécifiques aux disciplines scolaires.

1.2.2 Difficultés au niveau du contrôle inhibiteur

Concernant le contrôle inhibiteur, la recherche a établi une relation directe entre des difficultés à inhiber et les performances scolaires (p. ex., Allan *et al.*, 2014 ; Blair et Razza, 2007 ; Espy *et al.*, 2004 ; Peng *et al.*, 2012 ; Szucs *et al.*, 2013). Par exemple, Blair et Razza (2007) ont observé que, chez les enfants de niveau préscolaire, ceux dont le contrôle inhibiteur était le moins performant étaient aussi ceux qui avaient le plus de difficultés dans les habiletés émergentes en mathématiques (connaissances mathématiques) et en littératie (connaissances des lettres et conscience phonologique).

Différentes recherches suggèrent que la relation entre les problèmes d'inhibition et des performances scolaires plus faibles serait médiée par les différents rôles du contrôle inhibiteur. Globalement, le contrôle inhibiteur permet d'atteindre un objectif en contrôlant les comportements (Diamond, 2013). Sans contrôle inhibiteur, ou lorsqu'il est altéré, il serait difficile de résister aux impulsions, habitudes, réponses mentales ou comportementales conditionnées ainsi qu'aux réponses automatiques provoquées par des stimuli extérieurs (Diamond, 2013). Plus précisément, le contrôle inhibiteur permet

notamment le contrôle attentionnel, qui consiste en la capacité d'ignorer les stimuli naturellement attractifs, car saillants (Posner et DiGirolamo, 1998), pour se concentrer sur ceux délibérément choisis pour atteindre un but (Diamond, 2013). Autrement dit, des difficultés au niveau du contrôle attentionnel peuvent se traduire par une tendance à réagir à chaque bruit, au lieu de parvenir à rester concentré sur un exercice. Les enfants ayant une dyscalculie pure ont d'ailleurs tendance à ne pas parvenir à ignorer la saillance de certains stimuli, même lorsqu'elle est non pertinente pour la tâche, suggérant un problème au niveau du contrôle inhibiteur (Szucs *et al.*, 2013). Par exemple, dans une tâche de comparaison de nombres non symboliques, si dans un ensemble les points sont plus gros que dans l'autre, les enfants dyscalculiques ont tendance à déterminer que l'ensemble ayant les points les plus gros est celui qui a le plus de points, car ils ne seront pas parvenus à ignorer la saillance des gros points (Wilkey *et al.*, 2018). La saillance des stimuli peut aussi être acquise. C'est le cas dans les comparaisons de nombres décimaux (Roell *et al.*, 2019) ou de fractions (Gómez *et al.*, 2015 ; Rossi *et al.*, 2019). Dans ces contextes, les élèves ont tendance à juger de la magnitude des nombres en se basant sur la magnitude d'une partie isolée de chacun des nombres, à cause d'une saillance acquise. Par exemple, dans le cas des fractions, cette tendance va mener à l'erreur de dire que $\frac{1}{4}$ est plus grand que $\frac{1}{2}$ puisque 4 est plus grand que 2. La saillance acquise se caractérise par le fait que la différence de magnitude des dénominateurs pris isolément capte l'attention, au détriment du traitement des fractions dans leur globalité. Rossi et ses collaborateurs (2019) ont pu observer grâce à l'imagerie cérébrale que résister à cette tendance, à cette interférence d'une saillance acquise, nécessiterait de recourir au contrôle inhibiteur. Gómez et ses collaborateurs (2015) ont pour leur part montré qu'un contrôle inhibiteur moins efficace est associé à des difficultés dans les comparaisons de fractions.

Le contrôle inhibiteur inclut aussi le contrôle d'interférences, c'est-à-dire la capacité d'ignorer des éléments d'informations internes, comme des pensées, des souvenirs, des

informations rencontrées précédemment ou à venir, qui nuisent à la réalisation de la tâche en cours (Diamond, 2013). Ainsi, un élève avec des difficultés au niveau du contrôle d'interférences pourra avoir du mal à trier les informations qu'il a en tête en fonction de leur pertinence pour la tâche. Par exemple, dans l'énoncé d'un problème, il accordera autant d'importance au nom du personnage qu'aux quantités à calculer.

Le contrôle inhibiteur permet aussi l'autocontrôle, c'est-à-dire contrôler son comportement et ses émotions (Diamond, 2013). Il s'agit de résister aux tentations (Diamond, 2013). Cela inclut notamment la tolérance au délai de gratification, c'est-à-dire être capable de réaliser une tâche difficile du point de vue de l'autocontrôle dans la perspective de la récompense qui viendra plus tard (Mischel *et al.*, 1989). Avec peu d'autocontrôle, il est difficile de résister à quelque chose qui fait envie et qu'il est possible d'obtenir immédiatement, comme faire ses devoirs alors que la console de jeux vidéo est à portée de la main. L'autocontrôle permet aussi de ne pas agir impulsivement (Diamond, 2013), comme ne pas parler dès qu'on en a envie. En somme, l'autocontrôle aide à apprendre à attendre (Diamond 2013).

On voit donc que les difficultés d'inhibition peuvent affecter le comportement général, et particulièrement celui face aux apprentissages. En ce sens, Blair et Razza (2007) ont montré qu'un retard dans la maîtrise de l'alphabet au préscolaire s'expliquait en partie par des problèmes généraux de comportement dus à un manque d'autocontrôle, suggérant que les problèmes comportementaux induits par un contrôle inhibiteur moins efficace nuisent aux apprentissages. Kegel et Bus (2013), qui ont observé un lien entre le patrimoine génétique, le contrôle attentionnel et la maîtrise de l'alphabet, ont précisé que les interventions auprès des enfants qui ont du retard dans l'acquisition de l'alphabet ne devraient pas se cantonner au domaine de la littératie, mais devrait aussi « soutenir l'engagement des enfants dans la tâche » [traduction libre] (p. 1), autrement dit les aider à travailler avec leurs facultés attentionnelles ce qui passerait par les aider à développer leurs facultés attentionnelles.

1.2.3 Difficultés au niveau de la flexibilité cognitive

Bien qu'il y ait moins de recherche portant spécifiquement sur la flexibilité cognitive, certaines études ont fait ressortir des liens entre une flexibilité cognitive moins efficace et des difficultés dans les apprentissages. Des difficultés au niveau de la flexibilité cognitive ont été associées à des problèmes en compréhension de lecture (Cartwright, 2012). Les enfants ayant une flexibilité cognitive moins efficace auraient tendance à se concentrer sur la composition des mots, et donc le décodage graphophonétique, et ainsi à moins prêter attention au sens desdits mots, ce qui mènerait aux difficultés de compréhension des textes lus (Cartwright, 2012). En mathématiques aussi, de faibles performances ont été associées avec des problèmes de flexibilité cognitive et plus précisément à la difficulté à passer d'une information, d'un élément à l'autre assez rapidement (Willcutt *et al.*, 2013).

Il ressort ainsi que des FE moins performantes seraient associées à des problèmes précis pouvant affecter les performances académiques en limitant la capacité à profiter des apprentissages (Engel de Abreu *et al.*, 2014). Cela signifie que la réussite académique dépendrait, du moins en partie, du bon fonctionnement des FE des élèves.

1.3 Entraînements cognitifs, une avenue intéressante pour favoriser la réussite scolaire ?

Des FE efficaces faciliteraient la réussite scolaire, notamment en soutenant le développement des compétences de base dans divers apprentissages. À l'opposé, des FE moins efficaces, en plus d'amener des difficultés spécifiques dans le développement des apprentissages, semblent avoir un impact sur la capacité même à bénéficier des apprentissages. En somme, la variabilité dans les résultats scolaires s'expliquerait en partie par le niveau d'efficacité des FE des élèves. Il ressort donc qu'une piste d'intervention pour favoriser la réussite académique serait de viser directement l'amélioration des FE. Autrement dit, intervenir auprès des enfants directement afin de

soutenir leur mémoire de travail, leur contrôle inhibiteur ou leur flexibilité cognitive pour accompagner les apprentissages exigeants cognitivement, comme la lecture, pourrait permettre de limiter les retards dans leurs apprentissages (Diamond, 2016). Les chercheurs se sont donc saisis de la question de savoir si améliorer les FE permettrait effectivement de favoriser la réussite scolaire.

Travailler directement les FE est le but des entraînements cognitifs. Il s'agit d'entraîner des processus cognitifs non spécifiques à des tâches, des processus supérieurs, généraux, afin de viser des effets larges et non limités à un type de tâche. En contexte éducatif, une approche peut alors être d'intervenir en amont des apprentissages et des compétences, pour développer et renforcer les processus cognitifs nécessaires aux apprentissages et au fonctionnement cognitif optimal (Diamond, 2016). Ces interventions peuvent se faire avec des populations variées. Avec des personnes âgées, il s'agit surtout de retarder le déclin cognitif en faisant travailler les FE (p. ex., Grimaud *et al.*, 2017). Avec des populations neurologiquement atypiques, le but est plus de compenser le déficit en augmentant les capacités d'autres processus cognitifs ou de réduire le déficit en mobilisant le processus cognitif sous-efficace (p. ex., Shalev *et al.*, 2007). Avec des enfants, au lieu de travailler sur la façon dont on enseigne ou encore sur les contenus enseignés, ces interventions cherchent à développer les processus cognitifs sous-jacents aux apprentissages, avant ou pendant qu'ils sont réalisés, afin de mieux les soutenir (p. ex., Blakey et Carroll, 2015). Autrement dit, les tâches offertes cherchent à cibler des compétences plus basiques et profondes des apprenants. Par exemple, dans le cadre de la lecture, il s'agit de développer les processus cognitifs généraux impliqués dans la lecture, comme la mémoire de travail (p. ex., Loosli *et al.*, 2012), avant ou pendant que l'enfant développe ses compétences en lecture, afin d'en soutenir l'apprentissage et améliorer les performances. En somme, il s'agit d'intervenir en amont des tâches scolaires pour les faciliter.

Cette voie est explorée depuis une vingtaine d'années maintenant (de Ribaupierre, 2016). Des équipes de recherche ont développé de nombreux programmes d'entraînement ciblant les FE. Par exemple, Zhao et ses collaborateurs (2016) ont choisi d'entraîner exclusivement une composante du contrôle inhibiteur, l'inhibition de réponse, d'enfants de 10 à 12 ans et d'adultes de 18 à 24 ans, avec une tâche de go/no-go qui consiste à répondre le plus rapidement possible lorsqu'un stimulus appartenant à la catégorie go apparaît et s'empêcher de répondre quand un stimulus de la catégorie no-go apparaît. Leur objectif était de voir quels étaient les effets de l'entraînement sur l'inhibition de réponse même, sur le contrôle inhibiteur en général, et sur les autres FE puisqu'elles n'avaient pas été ciblées directement lors de l'entraînement. Ce type de protocole permet de mieux cerner les relations de cause à effet au sein de chacune des FE et entre elles. En ciblant une seule FE ou même un processus spécifique d'une FE, il est plus facile de voir les effets de l'entraînement sur les compétences présumées dépendantes de la FE entraînée, ainsi que l'effet de cet entraînement isolé sur les autres FE. Kable et ses collaborateurs (2017) ont choisi à l'inverse de recourir à un programme d'entraînement cognitif complet, c'est-à-dire qui cherche à entraîner toutes les FE, avec de jeunes adultes. L'entraînement, un programme informatisé nommé Luminosity, se composait de 63 jeux inspirés des tâches d'évaluation cognitives, chacun ciblant une FE particulière, mais le programme dans son ensemble faisait travailler toutes les FE. Ce type d'entraînement a l'avantage de permettre éventuellement la détection d'un effet lorsque toutes les FE sont entraînées par rapport au fait d'entraîner une seule isolément. Autrement dit, explorer la possibilité qu'il faille entraîner toutes les FE en même temps pour qu'elles puissent s'améliorer, ce qui suggérerait alors qu'elles sont interdépendantes. Derrière ce choix méthodologique peut aussi se trouver une volonté de chercher une réponse aux interrogations théoriques actuelles quant à l'organisation des FE. Plusieurs modèles d'organisation coexistent (Baddeley, 2000 ; Baddeley et Hitch, 1974 ; Cowan, 1988 ; Miyake et Friedman, 2012). Choisir d'entraîner les FE isolément ou ensemble peut permettre d'apporter un argument en faveur ou en défaveur d'un modèle ou un autre. Une autre approche des

entraînements cognitifs est de ne pas chercher à travailler directement les FE, comme l'ont fait Mackey et ses collaborateurs (2011) avec des enfants de sept à neuf ans, mais plutôt de voir l'effet sur les FE de diverses tâches. En l'occurrence, il s'agissait de jeux de raisonnement, partant du principe que les tâches de raisonnement mobilisent plusieurs FE. Cela permet de voir si entraîner les FE devrait plutôt se faire avec des tâches riches et complexes.

Ces quelques exemples permettent d'observer que les entraînements sont variés. Les différentes cibles possibles des entraînements et les variations méthodologiques possibles lors de leur élaboration créent une multiplicité de combinaisons des variables caractérisant un entraînement cognitif. Selon la conception présentée, les trois FE peuvent chacune être divisées en différents processus cognitifs comme le contrôle attentionnel et l'inhibition d'interférence pour le contrôle inhibiteur. Il faut aussi considérer la population visée par l'entraînement. Par exemple pour les enfants, il est possible de diviser en plusieurs tranches d'âges différentes selon que l'on considère des facteurs développementaux ou des repères scolaires. Il est aussi possible de s'intéresser aux adultes ou aux personnes âgées, ainsi qu'aux populations typiques ou atypiques d'un point de vue cognitif. Il y a ensuite la forme même de l'entraînement : certains utilisent un ordinateur et ressemblent à des jeux (p. ex., Blakey et Carroll, 2015), d'autres sont des tâches très répétitives (p. ex., Zhao, Chen et Maes, 2016), certains sont à base d'exercices physiques (p. ex. Chaddock-Heyman *et al.*, 2013), d'autres de raisonnement (p. ex., Mackey *et al.*, 2011). Enfin, il faut considérer la fréquence et la durée totale des entraînements. La quantité de variables à prendre en compte dans ce domaine de recherche est considérable, ce qui explique la grande variété dans les études d'entraînements réalisées à ce jour.

Les recherches en entraînement cognitif ont été stimulées par des résultats prometteurs. Par exemple, Holmes et ses collaborateurs (2009) ont observé qu'un entraînement de la mémoire de travail avait eu des effets positifs significatifs sur le développement des

compétences en mathématiques chez des enfants ayant des difficultés d'apprentissage dans cette discipline. Pour leur part, Klingberg et ses collaborateurs (2005) ont observé, suite à un entraînement de la mémoire de travail avec un programme informatisé d'enfants ayant reçu un diagnostic de trouble déficitaire de l'attention, une amélioration dans les performances des participant·e·s dans des tâches non entraînées de mémoire de travail, de contrôle inhibiteur et de raisonnement. De leur côté, Raver et ses collaborateurs (2011) ont suivi des enfants de niveau préscolaire participant·e·s au Chicago school readiness project dont un volet implique un travail explicite du contrôle inhibiteur, et ont observé une amélioration des FE des enfants du groupe expérimental. Ces exemples de résultats positifs suggèrent que l'entraînement cognitif pourrait être un moyen pour améliorer les FE, et incidemment les performances académiques des enfants en favorisant leur capacité à apprendre.

Diamond (2016) préconise l'entraînement cognitif particulièrement auprès des jeunes enfants, c'est-à-dire avant la scolarisation obligatoire à six ans. Selon la chercheuse, il s'agit de créer des conditions favorables à la scolarité de tout enfant. Un enfant avec des FE moins développées pourrait par exemple manifester de moindres compétences inhibitrices, ce qui pourrait le mener à être plus impulsif ou à rester concentré moins longtemps. La chercheuse suggère que ces comportements sont néfastes à la scolarité : remarques des enseignants, moins bonnes notes, faible attente de réussite des enseignants, faibles attentes de réussite de l'élève, ce qui entretiendrait les comportements inadéquats. À l'inverse, un enfant qui commence l'école avec des FE plus développées aurait plus tendance à manifester les comportements valorisés en contexte scolaire, comme la concentration, l'écoute et l'attention. Dans la mesure où le niveau des FE avant l'entrée à l'école constitue un bon indice du niveau de préparation à l'entrée à l'école (Blair et Razza, 2007) et de la réussite scolaire à venir (Alloway et Alloway, 2010), les arguments de Diamond (2016) semblent pertinents pour favoriser l'adaptation des enfants au système scolaire et, incidemment, leur réussite scolaire. De plus, les enfants issus de milieux moins favorisés tendent à avoir des FE moins

développées à l'entrée à l'école que les enfants issus de familles ayant un statut socio-économique plus élevé (Hackman *et al.*, 2015). L'entraînement cognitif réalisé avec de jeunes enfants pourrait être une voie à explorer afin de favoriser l'équité éducative.

En somme, améliorer les FE en les entraînant a été envisagé par de nombreuses équipes de recherches. Les entraînements qui en découlent sont très variés, selon qu'ils ciblent une ou plusieurs FE, mais aussi selon la population visée ou encore la forme de l'entraînement. Ce courant de recherche a été encouragé par des résultats positifs, suggérant qu'il était effectivement possible d'améliorer les FE. Considérant l'importance des FE dans la scolarité, certains auteurs y voient ainsi une piste d'intervention prometteuse auprès des élèves.

1.4 Limites de la littérature sur les entraînements cognitifs pour trancher sur leur pertinence

Malgré leur intérêt et parfois des résultats encourageants, les entraînements cognitifs ne produisent pas toujours les effets escomptés, à savoir une amélioration des FE en général. Cela mène à se questionner sur la pertinence de ces entraînements. Cependant, cette remise en cause de l'efficacité des entraînements cognitifs en général ignore le fait que la grande majorité des entraînements ne vise que la mémoire de travail. De plus, les conclusions sur l'inefficacité se basent le plus souvent sur une absence de transfert des bénéfices de l'entraînement dans des tâches très différentes, ignorant les améliorations dans des tâches plus proches.

1.4.1 Inconsistance des résultats, voire doutes sérieux sur l'efficacité

Les résultats de ces entraînements cognitifs sont variables. Plusieurs études ont fait ressortir le côté prometteur des entraînements (p. ex., Chein et Morrison, 2010 ; Klingberg *et al.*, 2005 ; Raver *et al.*, 2011). D'autres ne sont pas parvenus à prouver l'efficacité de tels programmes d'entraînement (p. ex., Redick *et al.*, 2013 ; Harrison *et*

al., 2013). L'étude de Blakey et Carroll (2015) illustre à elle seule assez bien ces contradictions de résultats. Les chercheuses ont entraîné la mémoire de travail et le contrôle inhibiteur d'enfants d'âge moyen de 4,4 ans. Pendant un mois, à raison d'une session de 20 minutes par semaine, les enfants ont joué sur des tablettes, les jeux étant adaptés de tâches standardisées de mesure des FE chez les enfants. Elles ont observé une amélioration des performances en mathématiques et dans des tâches de mémoire de travail non entraînées, résultat encore présent trois mois après la fin de l'entraînement. Il n'y avait cependant pas d'amélioration au niveau du contrôle inhibiteur ni de la flexibilité cognitive. En somme, l'entraînement de la mémoire de travail semble avoir fonctionné, mais pas celui du contrôle inhibiteur, et cet entraînement n'a pas permis d'améliorer la flexibilité cognitive qui n'avait pas été entraînée. Autrement dit, une seule des FE entraînées s'est améliorée à la suite de l'entraînement, et la FE non entraînée ne s'est pas améliorée grâce à l'entraînement des deux autres. En revanche, il y a aussi eu un effet positif sur une tâche scolaire. Un mélange de résultats qui rend difficile de tirer une conclusion claire sur le potentiel des entraînements cognitifs.

Du côté des méta-analyses, la même inconsistance se retrouve. Certaines aboutissent à la conclusion que les entraînements fonctionnent et ont des effets positifs sur des tâches non entraînées (p. ex., Au *et al.*, 2015 ; Soveri *et al.*, 2017). Au et ses collaborateurs (2015) ont compilé les résultats d'études expérimentales d'entraînement de la mémoire de travail chez des adultes et ont conclu à un effet sur l'intelligence fluide avec une taille d'effet de 0,24, se traduisant en moyenne par une augmentation de 3 à 4 points de quotient intellectuel. Autrement dit, en entraînant la mémoire de travail, ces diverses interventions semblent avoir aussi amélioré l'intelligence fluide, qui n'était pourtant pas entraînée directement. D'autres méta-analyses à l'inverse (p. ex., Melby-Lervåg et Hulme, 2013 ; Sala et Gobet, 2017) tendent à conclure que l'effet de ces entraînements est trop faible pour qu'ils soient intéressants. Sala et Gobet (2017) ont compilé des résultats d'entraînement de la mémoire de travail auprès d'enfants âgés de 3 à 16 ans.

Ils ont conclu à un effet positif des entraînements sur les tâches de mémoire de travail ($g = 0,46$) qui semble se maintenir dans les mois suivants l'entraînement. En revanche, l'effet est faible, voire nul, quand ils s'intéressent à l'effet sur l'intelligence fluide ou le contrôle inhibiteur. De plus, les auteurs précisent que l'effet obtenu varie selon que les groupes expérimentaux et contrôle ont été composés aléatoirement ou non, les effets ayant tendance à être plus grands quand la répartition n'a pas été faite aléatoirement. L'effet varie aussi avec le type de groupe contrôle, l'effet observé ayant tendance à être inférieur quand le groupe contrôle est actif par rapport à un groupe contrôle passif, pouvant suggérer un effet d'intervention en général plus qu'un effet propre aux entraînements cognitifs. Ces deux dernières observations tendent à diminuer la validité des entraînements cognitifs. Ainsi, les méta-analyses ne posent pas toutes les mêmes conclusions quant aux effets qu'il est légitime d'attendre des entraînements cognitifs. Il faut tout de même souligner que la majorité des méta-analyses concluent plutôt à un manque d'effets suffisants des entraînements cognitifs pour justifier leur pertinence, et non à une absence d'effet (p. ex., Sala et Gobet, 2017).

Ainsi, il ressort de la recherche accumulée au cours des 20 dernières années que les entraînements cognitifs sont suffisamment souvent positifs pour que la recherche reste dynamique, mais trop souvent négatifs pour en assurer la pertinence.

1.4.2 Effets des entraînements de l'inhibition peu documentés et évaluation de l'efficacité en fonction de différents niveaux de transfert

Il convient cependant de nuancer les conclusions précédentes pour deux raisons. La première est que les études empiriques d'entraînement cognitif se sont très majoritairement intéressées à la mémoire de travail (de Ribaupierre, 2016), menant à moins d'études d'entraînement du contrôle inhibiteur et de la flexibilité cognitive. En conséquence, la plupart des méta-analyses ne pouvaient pas prendre en compte le contrôle inhibiteur et la flexibilité cognitive, faute d'études expérimentales, et

produisent ainsi des conclusions limitées à la mémoire de travail (p. ex., Au *et al.*, 2015 ; Melby-Lervåg et Hulme, 2013 ; Sala et Gobet, 2017). À notre connaissance, une seule méta-analyse (divisée en deux publications) a intégré le contrôle inhibiteur et la flexibilité cognitive dans ses analyses (Kassai *et al.*, 2019 ; Takacs et Kassai, 2019). Cet élément pourrait biaiser les conclusions des nombreuses méta-analyses s'intéressant aux entraînements cognitifs déjà existantes.

La seconde raison est liée aux objectifs mêmes des entraînements, c'est-à-dire voir une amélioration au niveau des FE et dans des domaines où il a été montré que les FE avaient un rôle, comme les performances académiques. Dans les faits, les participant·e·s s'entraînent sur des tâches plus ou moins nombreuses, mais ciblées et limitées au regard de ce qui est pratiqué, par exemple s'entraîner à ne pas appuyer sur un bouton quand on voit certains stimuli apparaître à l'écran (p. ex., Zhao *et al.*, 2016), ou alors sans lien direct avec les FE, comme l'exercice physique (p. ex., Chaddock-Heyman *et al.*, 2013). Ces choix méthodologiques reposent sur le postulat que des FE mieux développées permettent de meilleures performances, donc en travaillant les FE il deviendrait possible d'observer une amélioration dans les performances de tâches recourant aux FE. Ainsi, les chercheurs veulent voir si, à la suite des entraînements, il y a un effet sur des tâches différentes de celles de l'entraînement, comme des tâches scolaires. Autrement dit, il est question de transfert : les chercheurs explorent à quel point la connaissance ou compétence antérieurement acquise est réinvestie ultérieurement, ils explorent la capacité des entraînements à produire une amélioration des performances dans des tâches voisines, mais distinctes et non entraînées (Sala et Gobet, 2017). Par exemple, chercher à améliorer la mémoire de travail en général en faisant travailler les participant·e·s sur une tâche de *n-back*, qui consiste à rappeler un élément présenté *n* items plus tôt (du 2-back consisterait à demander quel élément a été présenté il y a deux items ; p. ex., Redick *et al.*, 2013). Ou entraîner la mémoire de travail avec plusieurs tâches pour voir si cela peut aussi améliorer les autres FE (p. ex., Blakey et Carroll, 2015). Ou encore, entraîner la mémoire de travail et chercher un effet

sur l'intelligence fluide (p. ex., Colom *et al.*, 2013). Or ce sont ces types de transferts qui semblent difficiles à observer (Sala et Gobet, 2017) menant à douter de l'efficacité de ces entraînements, et en conséquence à contester leur pertinence éducative. Cependant, ce constat se base possiblement sur une conceptualisation trop restreinte et exigeante du transfert. Le transfert est en effet souvent catégorisé de façon binaire : proche ou éloigné (p. ex., Melby-Lervåg et Hulme, 2013 ; Sala et Gobet, 2017). Il est dit proche lorsque les tâches sont semblables dans la forme et recourent aux mêmes processus cognitifs. Il est dit éloigné quand les tâches sont différentes dans la forme et recourent en grande partie à des FE différentes (Kassai *et al.*, 2019). Les études concluent alors souvent qu'un véritable transfert est impossible puisque le transfert éloigné ne survient pas. Or la très grande majorité des études parvient tout de même à obtenir un transfert dit proche (p. ex., Melby-Lervåg et Hulme, 2013), c'est-à-dire dans des tâches différentes de celles de l'entraînement, mais mobilisant le même processus cognitif. Autrement dit, des entraînements génèrent du transfert au moins jusqu'à un certain degré. La pertinence des entraînements pourrait dépendre de la définition précise de ce degré de transfert atteignable. Selon Haskell (2001), il existe un plus large éventail de transferts possibles que le proche et l'éloigné, autrement dit qu'entre deux tâches quasiment identiques et des tâches relevant de domaines différents ou recourant à des FE différentes. La variation du degré de similitude entre des tâches a plus que deux niveaux, et cette variation peut porter sur chacun des aspects de l'entraînement : son contenu, sa forme, sa durée ou encore son contexte de réalisation (Barnett et Ceci, 2002). Ces éléments pourraient servir à déterminer le degré de transfert atteint par les entraînements cognitifs avec plus de précision.

En somme, les conclusions actuelles des études empiriques d'entraînement cognitif réanalysées à travers des méta-analyses doivent inciter à se questionner sur la pertinence de ces entraînements. Cependant, il convient de tenir compte des limites de la classification habituelle du transfert et de son impact potentiel sur lesdites conclusions.

1.5 Enjeux liés à ce problème scientifique

La pertinence de faire des entraînements cognitifs demeure à ce jour une question sans réponse claire. C'est une des raisons qui fait que la recherche sur ce sujet demeure dynamique et utile. Cependant, il est important tenir compte de ce que les recherches ont dégagé comme résultats jusqu'à maintenant afin de les compléter. C'est pourquoi il importe de faire ressortir les enjeux de ce problème scientifique, et notamment les limites et contraintes des résultats antérieurs et les pistes d'interprétation et de mise en œuvre encore à explorer.

1.5.1 Considérations liées à la population ciblée par l'entraînement

Les sections précédentes ont fait ressortir un intérêt pour les entraînements cognitifs, notamment dans le cadre d'un soutien au développement des FE afin d'améliorer la réussite scolaire. Cependant, la recherche n'a pas encore pu conclure à un effet pertinent de ces entraînements, car les effets positifs ont tendance à être limités, c'est-à-dire à ne s'observer que pour des tâches plutôt semblables à celles entraînées. En somme, suite aux entraînements, il semble improbable d'observer une augmentation de l'intelligence des enfants. Comme il a été soulevé précédemment, cette conclusion a elle-même une pertinence limitée. D'une part, l'effet souhaité pourrait être moins vaste et éloigné de l'entraînement que ce que cherchent à trouver les études expérimentales et les méta-analyses sur les entraînements cognitifs. D'autre part, les effets relevés ont tendance à être catégorisés de façon binaire, transferts proche et éloigné, limitant leur interprétation. Il existe en effet une plus grande variété de types de transferts qui ne sont pas encore véritablement exploités dans les études d'entraînements cognitifs et particulièrement dans les méta-analyses. Ainsi, bien que la pertinence de ces entraînements demeure incertaine, il semble prématuré de conclure à leur inefficacité et de s'en désintéresser. La recherche sur les entraînements cognitifs demeure justifiable considérant les limites de la recherche existante, afin de dépasser les limites

identifiées. En somme, afin de déterminer s'il est pertinent de faire de l'entraînement cognitif, il semble important de déterminer quel type de transfert peut être observé et si l'intervention amène un effet suffisant au regard des contraintes qu'elle impose.

Ces considérations sont particulièrement vraies dans le milieu scolaire où le choix des interventions doit être fait avec soin puisque les moyens et le temps disponibles sont limités. Une intervention qui aurait un effet très limité, pour lequel l'amélioration et le transfert se limiteraient aux tâches entraînées et aux tâches très semblables, serait en concurrence avec l'enseignement en lui-même. En combinant toutes les études comparant l'efficacité d'interventions pédagogiques, une taille d'effet moyenne de 0,49 est obtenue (Hattie, 2009). Cela signifie que l'intervention testée est en général plus efficace que l'intervention de référence utilisée (ou l'absence d'intervention) et que l'écart d'efficacité est d'une ampleur moyenne. Lors de l'élaboration d'une nouvelle intervention, un effet semblable peut être attendu et recherché. Une intervention qui aurait une taille d'effet inférieure, *a fortiori* si elle a un potentiel de transfert limité, serait possiblement peu pertinente. Si une telle intervention avait par contre un transfert plus grand, alors ce critère pourrait éventuellement être écarté. Les entraînements cognitifs sont étudiés parce qu'ils permettraient d'améliorer les FE, qui elles-mêmes jouent des rôles clés dans les apprentissages (en lecture, p. ex., Bauer et Varga, 2016 ; en mathématiques, p. ex., Espy *et al.*, 2004). Si une intervention sur la mémoire de travail parvenait à améliorer de façon assez large la mémoire de travail, alors il serait légitime de s'attendre à un effet sur les apprentissages qui reposent beaucoup sur la mémoire de travail, comme l'acquisition de la fluidité en lecture (Landerl et Wimmer, 2008). Pour de telles interventions, la pertinence reposera donc sur la capacité à voir un effet dans les diverses tâches scolaires qui mobilisent la FE entraînée. Le fait que jusque-là de tels effets soient contestés repose en partie sur des incertitudes quant à la durée, la fréquence et la forme des interventions, mais aussi le fait qu'entraîner une seule FE soit suffisant ou non pour observer des effets sur la FE entraînée (Diamond, 2013). Au regard de cet aspect, il semble qu'un travail de recherche pertinent en lien

avec les entraînements cognitifs, particulièrement en ce qui concerne les enfants, consiste à s'intéresser à l'ampleur du transfert et à la taille d'effet qui le caractérise pour déterminer quand et sous quelles conditions les entraînements sont efficaces.

De plus, se prononcer sur la pertinence de ces entraînements suppose aussi d'isoler différentes variables afin de déterminer les conditions propices à leur efficacité potentielle. Concrètement, il peut s'avérer nécessaire de distinguer finement entre les populations avant de pouvoir répondre à cette question. Par exemple, même en ciblant déjà les enfants, il serait judicieux de vérifier l'effet des entraînements avec des sous-populations, en fonction de leur âge ou en fonction de leur stade de développement cérébral comme l'ont fait Blakey et Carroll (2015) en expérimentant leur programme avec uniquement des enfants d'âge préscolaire. Il est aussi possible de distinguer les populations en fonction de leur fonctionnement cognitif typique (p. ex., Redick *et al.*, 2013) ou atypique (p. ex., Klingberg *et al.*, 2005), ou encore, pour des enfants typiques, en fonction de leurs performances académiques (p. ex., Holmes *et al.*, 2009). Il est important de montrer l'impact des entraînements cognitifs en tenant compte de chacune des populations, c'est-à-dire de conclure sur leur efficacité relative dans chacun des cas.

Considérant ces informations, il est actuellement difficile d'affirmer que les entraînements cognitifs valent la peine d'être utilisés, mais il est peut-être trop tôt pour conclure à leur inefficacité. Il convient donc de continuer de se poser la question de la pertinence des entraînements cognitifs en prenant en considération le large panel d'entraînements existants selon leurs modalités et la population visée, et notamment ceux qui ciblent le contrôle inhibiteur et la flexibilité cognitive.

1.5.2 Considérations liées au degré de transfert réellement obtenu

Il a été expliqué plus haut que les méta-analyses concluent presque toutes que les entraînements sont peu efficaces et donc non pertinents, puisque le transfert éloigné semble impossible (p. ex., Sala et Gobet, 2017). Concrètement, les méta-analyses de

Sala et Gobet (2017) et Au et ses collaborateurs (2015) ont défini le transfert éloigné comme une amélioration de l'intelligence fluide. Melby-Lervåg et Hulme (2013) expliquent que les effets des entraînements ne se généralisent pas vraiment, autrement dit que les entraînements cognitifs ont au mieux un effet bénéfique sur les tâches similaires à celles de l'entraînement, mais pas sur des tâches complètement différentes, comme la résolution de problèmes.

Ces constats quant à une absence de généralisation des effets amènent deux réflexions. La première concerne les qualificatifs de proche et éloigné pour le transfert. La ressemblance ou l'éloignement entre deux tâches peut être manipulé, comme c'est le cas des apprentissages scolaires : progressivement on diminue la ressemblance entre les tâches afin de favoriser un apprentissage profond, qui fait abstraction des éléments contextuels des tâches (Day et Goldstone, 2012). Cela montre que la binarité du transfert utilisé dans les études d'entraînement cognitif est probablement réductrice et qu'il serait plus juste et productif de le concevoir comme un continuum où proche et éloigné seraient les extrémités.

La seconde réflexion concerne les éléments auxquels on appose les qualificatifs de proche ou éloigné. Les études et les méta-analyses d'entraînements cognitifs posent des conclusions globales quant au transfert observé, c'est-à-dire est-ce qu'il y a transfert ou non. Or, d'après Barnett et Ceci (2002), il faudrait s'intéresser au transfert pour chacun des aspects des entraînements. Autrement dit, poser une conclusion quant au transfert éloigné sur un entraînement de façon globale ne prend pas en considération le fait que l'éloignement peut varier à travers les caractéristiques de l'entraînement. La variation dans les variables des entraînements fait qu'il faudrait se prononcer sur le degré de proximité pour chacune d'entre elles avant de se prononcer sur la pertinence générale d'un entraînement. Par exemple, le degré d'éloignement peut être manipulé dans le contenu des tâches, le contexte de réalisation des tâches, le support sur lequel sont réalisées les tâches ou encore la présence ou l'absence d'indices pour faciliter le

transfert. La dichotomie transfert proche versus transfert éloigné néglige plusieurs sous-types potentiels de transfert basés sur ces variations dans la forme, le contenu ou le contexte des tâches (Haskell, 2001). S'y intéresser pourrait permettre de mieux qualifier le transfert réellement obtenu, et d'identifier les caractéristiques des entraînements cognitifs pouvant réellement, le cas échéant, favoriser ce transfert. Ainsi, l'efficacité et la pertinence des entraînements cognitifs en seraient précisées.

En somme, la pertinence des entraînements cognitifs est dépendante de la considération de nombreuses variables. Les constats au sujet de cette pertinence devraient donc être associés aux variables étudiées et la conclusion générale suspendue à l'étude de toutes les variables pertinentes. Or cette approche est peu mise de l'avant. De plus, pour chaque variable d'intérêt, il faut aussi considérer des niveaux de transfert variés généralement non étudiés. C'est pourquoi la question de l'intérêt des entraînements cognitifs demeure ouverte.

1.6 Question de recherche

Considérant les liens exposés entre la réussite scolaire, les habiletés académiques, les apprentissages, les capacités cognitives et les FE, il est pertinent d'envisager l'entraînement cognitif comme voie d'intervention auprès des élèves. Le problème actuel se caractérise par des résultats mitigés et, somme toute, peu encourageants faisant douter les chercheurs de la capacité à transférer ce qui est appris dans les entraînements dans un nouveau contexte, dans de nouvelles tâches, comme lors de la réalisation de tâches scolaires.

Cependant, il se pourrait que ce faible résultat récurrent soit lié à une catégorisation restreinte du transfert. Une catégorisation riche du transfert associée à une prise en compte des variables d'intérêt, comme l'âge ou la forme de l'entraînement, est une approche rare dans le domaine de l'entraînement cognitif qui légitime la question de

recherche suivante : *Quel est le niveau d'efficacité, pour chaque niveau de transfert en lien avec des variables d'intérêt, des entraînements cognitifs visant le développement des FE ?* L'objectif est donc d'examiner le niveau de transfert obtenu dans le cadre d'entraînements cognitifs, par des études d'entraînement des FE déjà réalisées, colligées dans une méta-analyse, selon une typologie détaillée des niveaux de transfert, afin de mieux définir le niveau de transfert atteignable avec de telles interventions. De cette façon, il devrait devenir plus clair si intervenir auprès des élèves avec des entraînements des FE est pertinent du point de vue éducatif. Parvenir à déterminer, selon les conditions posées par la question de recherche, si de tels entraînements sont efficaces reviendra à dire s'ils permettent effectivement une amélioration des FE ou non. Le degré de transfert identifié permettra de savoir dans quelle mesure et comment des effets peuvent être attendus ou non en contexte éducatif.

CHAPITRE II

CADRE THÉORIQUE

Dans ce chapitre sont présentés les concepts centraux de ce projet de recherche. Afin de pouvoir réaliser une méta-analyse s'intéressant au niveau d'efficacité des entraînements visant le développement des FE, il faut expliciter ce que sont les FE. Ces processus cognitifs sont au cœur du comportement humain, pourtant leur conceptualisation et la compréhension de leur structure demeurent sujettes à discussion. Les différents modèles d'organisation des FE sont présentés. Cependant, la plus importante dissension concerne les effets des entraînements des FE. Cela renvoie au transfert d'apprentissage, un vaste concept aux définitions opérationnelles variées. Il faut donc préciser ce qui est entendu par transfert d'apprentissage dans cette recherche, du point de vue formel et opérationnel, afin de mieux cibler et interpréter les effets d'entraînements étudiés.

2.1 Fonctions exécutives

Les FE regroupent de multiples processus cognitifs. Tous n'interviennent cependant pas au même niveau de traitement des informations. Il convient donc de dégager à quel moment un processus cognitif devient une FE, et d'identifier ces FE. Vient ensuite le problème de leur organisation. Étant des construits, leur modélisation est théorique et donc sujette à interprétation. Parmi les modèles présentés, il convient de déterminer

celui qui doit être retenu afin d'explorer les études d'entraînement cognitif à l'aune de son organisation.

2.1.1 Identification et définition des fonctions exécutives de base

Cette section présente la définition du concept de FE afin de comprendre quel est leur rôle dans le comportement humain, complétée par une définition de chacune des trois FE principales : la mémoire de travail, le contrôle inhibiteur et la flexibilité cognitive. Ainsi, il devient possible de distinguer leur rôle respectif, ainsi que leurs limites, notamment dans une optique développementale.

2.1.1.1 Définition du concept de fonctions exécutives

Les FE sont présentées comme un « ensemble de mécanismes de contrôle général [...], qui régulent la dynamique de la cognition et des actions humaines » [traduction libre] (Miyake et Friedman, 2012, p. 8). Autrement dit, il s'agit de processus cognitifs qui en contrôlent d'autres afin d'assurer une certaine cohésion des comportements, mentaux et moteurs, permettant notamment d'atteindre un but (Friedman et Miyake, 2017). Miyake et Friedman (2012) ajoutent que ce sont « les composantes centrales [...] de la capacité d'autorégulation » [traduction libre] (p. 8), ce que Diamond (2013) explicite comme suit : les FE sont un contrôle exécutif, cognitif, qui se traduit par un ensemble de processus descendants permettant de se concentrer et de faire attention quand les automatismes, l'instinct ou les intuitions sont inadaptés ou insuffisants (Braver *et al.*, 2010 ; Diamond, 2013 ; Espy *et al.*, 2004). Ces processus descendants, semblables aux « mécanismes de contrôle général » [traduction libre] de Miyake et Friedman (2012, p. 8), sont issus de notre fonctionnement interne, et non de stimulations externes ; ils permettent de réguler le traitement desdites stimulations externes selon les attentes ou les connaissances (Ward, 2010). Ainsi, les FE permettent de sélectionner certaines stimulations et d'en écarter d'autres selon les besoins contextuels, sans quoi chaque nouvelle stimulation viendrait, de façon incontrôlée, remplacer la précédente, sans

pouvoir orienter l'attention. Les FE permettent donc de se focaliser sur une stimulation particulière, comme une consigne orale, d'ignorer des stimulations non pertinentes sur le moment, comme des bruits ordinaires à l'extérieur, de passer d'une stimulation à une autre au besoin, comme changer de tâche. Autrement dit, le rôle des FE est d'orienter le travail cognitif afin d'adopter un comportement adéquat. Étant des processus de contrôle, le travail qu'elle réalise n'est pas automatisé ni automatisable. Dès lors que le travail devient automatisé, les FE sont peu sollicitées comme le suggère la diminution de l'activité cérébrale des régions impliquées dans les FE après un apprentissage (Chein et Schneider, 2005).

Il faut noter que recourir aux FE demande un effort cognitif (Diamond, 2013), car ce sont des processus « stratégiquement déterminés », non automatiques (Houdé, 2018, p. 26). À l'inverse, les processus automatiques sont inconscients et exécutés sans effort cognitif (Houdé, 2018). Cela entraîne deux conséquences principales. La première est qu'exercer son contrôle exécutif prend plus de temps que de recourir à des automatismes (Houdé, 2018). La seconde est que recourir à son contrôle exécutif mobilise plus de ressources cognitives que d'utiliser des automatismes. En conséquence, les FE peuvent être ponctuellement inutilisées ou inutilisables à cause du coût cognitif qu'elles imposent (Houdé, 2018). Dans ce sens, Diamond (2013) insiste sur les effets délétères de plusieurs facteurs, comme le stress ou la fatigue, sur les FE. Un individu fatigué aura moins de ressources cognitives et sera donc moins en mesure de mobiliser ses FE. En conséquence, il recourra essentiellement à des automatismes pour diriger ses comportements, pouvant être inadaptés ou insuffisants.

Par ailleurs, les FE sont des processus qui se développent pour l'essentiel pendant l'enfance et l'adolescence (Diamond, 2002, 2016 ; Miyake et Friedman, 2012), mais qui continuent à s'améliorer jusqu'au début de l'âge adulte avant de commencer à décliner (Ferguson *et al.*, 2019). Ainsi, les habiletés qui leur sont liées vont s'améliorer avec l'âge et la pratique. En conséquence, les FE sont moins performantes chez un

enfant qu'un adulte, les limites des FE qui existent chez les adultes étant encore plus prégnantes chez les enfants. Autrement dit, ils sont capables de traiter efficacement moins d'informations que les adultes.

Ainsi, il ressort de cet exposé que les FE sont des processus cognitifs permettant à chaque individu d'orienter et contrôler ses comportements, de façon volontaire et coûteuse en ressources cognitives, se développant avec l'âge. Cependant, parler de FE n'est pas assez précis pour comprendre exactement quels sont les processus cognitifs concernés. Il est donc nécessaire d'identifier chacune des FE.

2.1.1.2 Identification des trois fonctions exécutives centrales

Dans la littérature scientifique, de multiples processus cognitifs supérieurs sont présentés comme des FE (Diamond, 2013 ; Espy *et al.*, 2004), tels la mémoire de travail, le contrôle inhibiteur, la flexibilité cognitive, mais aussi l'attention, la planification, le jugement, le raisonnement, la résolution de problèmes ou la prise de décision (Diamond, 2013). L'inconvénient de ce groupe de processus est qu'il n'est pas homogène. Certains de ces processus peuvent être vus comme les processus de base : la mémoire de travail, le contrôle inhibiteur et la flexibilité cognitive (Diamond, 2013). D'autres sont en fait une combinaison de plusieurs processus cognitifs, c'est-à-dire qu'ils se construisent sur les processus de base, comme la planification et la résolution de problèmes (Diamond, 2013). Par exemple, l'attention concerne les trois processus de base en sélectionnant l'information à traiter et en assurant son maintien (rôle de la mémoire de travail), en permettant le changement des informations selon les exigences (rôle de la flexibilité cognitive) et en faisant ignorer les distractions (rôle du contrôle inhibiteur; Houdé, 2018). C'est pourquoi Diamond (2013) souligne l'importance de distinguer les FE de bas niveau, de celles de plus haut niveau, qui s'appuient sur les FE de bas niveau, comme l'autorégulation, l'intelligence fluide ou la planification.

Ainsi, le plus souvent (p. ex., Diamond, 2013 ; Lehto *et al.*, 2003 ; Smith et Jonides, 1999), le titre de FE est attribué uniquement à trois processus, les mieux circonscrits et plus fondamentaux comparativement aux autres processus cognitifs parfois appelés FE de haut niveau (Miyake *et al.*, 2000). Il s'agit de la mémoire de travail, du contrôle inhibiteur et de la flexibilité cognitive. Ils sont centraux dans le fonctionnement cognitif humain et sont à la base des processus cognitifs de plus haut niveau (Bull *et al.*, 2008 ; Diamond, 2013 ; Miyake *et al.*, 2000). Cette hiérarchie dans les processus cognitifs signifie que tout ce qui affecte, positivement ou négativement, les processus cognitifs de base affecte indirectement les processus cognitifs de plus haut niveau. C'est pourquoi, dans le cadre des entraînements cognitifs, cœur de ce projet de recherche, est ciblé le développement des FE de bas niveau. Autrement dit, il s'agit de travailler la base du fonctionnement cognitif humain pour l'améliorer. L'impact sur les processus de plus haut niveau devient alors un effet recherché, mais indirect. Par exemple, une étude peut chercher à améliorer les FE avec un entraînement cognitif et observer si cela a un effet incident sur l'intelligence (p. ex., Jaeggi *et al.*, 2008). Cependant, il n'est pas considéré que l'impact potentiel sur l'intelligence soit la même chose que l'amélioration des FE. C'est pourquoi à la fois les FE et l'intelligence sont évaluées dans ce contexte.

Ainsi, lorsqu'il s'agit de l'ensemble désigné sous le vocable FE, la conception la plus fréquente regroupe trois FE : la mémoire de travail, le contrôle inhibiteur et la flexibilité cognitive. Ce sont les FE de bas niveau, à partir desquelles les FE plus complexes sont élaborées. Il convient maintenant d'expliquer en quoi consiste chacune de ces FE de base afin de compléter la compréhension des FE.

2.1.1.2.1 Mémoire de travail

La mémoire de travail (MDT) est le processus régissant la « manipulation et l'encodage des informations entrantes pertinentes pour la tâche en cours, permettant le remplacement des informations [...] devenues obsolètes par des nouvelles, pertinentes

pour la tâche en cours » [traduction libre] (Miyake *et al.*, 2000, p. 57). Ainsi, lors de la réalisation d'une tâche, la MDT permet de maintenir présentes à l'esprit les informations pertinentes pour la tâche, que ce soit des informations issues de l'extérieur ou de nos connaissances, et de les manipuler pour développer un raisonnement, aboutir à une pensée, mais aussi mettre à jour ces informations en fonction de l'étape de réalisation de ladite tâche. Il s'agit donc d'un processus dynamique de manipulation de l'information stockée, et non de simple stockage temporaire (Diamond, 2013). Il se caractérise par un « contrôle constant et une addition/délétion rapide du contenu en mémoire de travail » [traduction libre] (Miyake et Friedman, 2012, p. 9). Baddeley et Hitch (1994) résument en suggérant que la MDT sert à retenir des informations en mémoire et à opérer des manipulations sur ces informations. C'est pour cette raison que Miyake et ses collaborateurs préfèrent l'expression mise à jour de la MDT ou actualisation de la MDT à l'expression usuelle de MDT (Miyake *et al.*, 2000 ; Miyake et Friedman, 2012).

La MDT a une capacité de traitement limitée, c'est-à-dire que la quantité d'informations pouvant être maintenues et manipulées est restreinte et finie. Selon Miller (1956), la limite serait fixée à sept éléments simultanément, avec une flexibilité de plus ou moins deux éléments selon les individus. Autrement dit, il serait possible de retenir et manipuler de cinq à neuf éléments en même temps. Par la suite, Cowan (2010) vint réduire l'empan de la MDT à quatre éléments, plus ou moins un. Nonobstant le chiffre exact de l'empan en MDT, il se dégage qu'une quantité finie et très réduite d'informations pourrait être utilisée en même temps. Avec l'accumulation de connaissances, il devient possible de partiellement déjouer cette limite en rassemblant des éléments en unité de sens ou *chunks* (Miller, 1956). Par exemple, il est possible de retenir une série de plus de cinq chiffres en les regroupant en nombres, comme pour les numéros de téléphone. Il est encore possible de recourir à des automatismes ou à des routines, lorsque c'est pertinent pour éviter d'utiliser inutilement la MDT (Raynal et Rieunier, 2014). C'est le cas, lors de la résolution d'un problème de mathématiques,

quand les résultats de calculs simples sont récupérés en mémoire à la suite d'un apprentissage par cœur des tables d'arithmétiques. Cela permet de laisser la MDT disponible pour les autres informations, pour les traitements plus complexes. À l'inverse, lorsque la quantité d'informations présentées dépasse la capacité individuelle de traitement, cela engendre une surcharge qui se traduit par une cessation de traitement efficace de l'information (Van Snellenberg *et al.*, 2015). Il en résulterait que soit les nouvelles informations ne sont pas enregistrées, soit des informations précédemment présentes en MDT sont oubliées. Dans les deux cas, ces informations ne pourront être utilisées. Autrement dit, la MDT cesse de remplir son rôle.

Baddeley et Hitch (1974; Baddeley, 2003) ont développé un modèle précis et complet de la MDT, qui permet de mieux se représenter son possible fonctionnement. Pour ces auteurs, la MDT est le système utilisé pour stocker et manipuler l'information nécessaire pour réaliser des tâches cognitives variées comme l'apprentissage, le raisonnement et la compréhension (Baddeley, 1992). Cette définition est proche de celle de Miyake et ses collaborateurs (2000). Leur modélisation de la MDT a mené à l'identification de sous-systèmes aux rôles spécifiques : la boucle phonologique, le calepin visuospatial, le tampon épisodique et l'administrateur central. La boucle phonologique sert à traiter l'information verbale. Elle retient temporairement les informations auditives ou visuelles pouvant être transcrites en sons, en les répétant si nécessaire (Baddeley, 2003). Le calepin visuospatial sert, quant à lui, à traiter l'information de type visuelle et spatiale. Il maintient les images en mémoire pour pouvoir les analyser, ou les transformer en code phonologique le cas échéant pour ensuite les transmettre à la boucle phonologique (Baddeley, 2003). Le tampon épisodique, pour sa part, sert à lier la mémoire à long terme à la MDT. Grâce à lui, les informations présentes en MDT peuvent être enregistrées de façon durable, et les informations déjà présentes en mémoire à long terme – les connaissances – peuvent être amenées en MDT pour être utilisées ou actualisées (Baddeley, 2003). Enfin, l'administrateur central a pour fonction de contrôler le flux d'informations qui se rend

à chacun des sous-systèmes : la boucle phonologique, le calepin visuospatial et le tampon épisodique. Concrètement, dans ce modèle, l'administrateur central est le pivot de la MDT. Il reçoit les informations à traiter issues de l'environnement et les achemine au sous-système compétent selon la nature de ces informations et les besoins de la tâche en cours (Baddeley, 2003). Par exemple, des mots entendus seront envoyés directement à la boucle phonologique, alors que des mots lus passeront d'abord par le calepin visuospatial pour une transcription phonologique. Donc, l'administrateur central sélectionne les informations et détermine le traitement qui leur sera appliqué (Baddeley, 2003). Pour que les informations atteignent l'administrateur central, il faut qu'il soit attentif aux stimuli. Il y a donc, dans ce modèle, un facteur attentionnel propre à la MDT (Raynal et Rieunier, 2007). L'attention est un processus cognitif fréquemment inclus dans les FE au sens large (Diamond, 2013). Cependant, pour la plupart des auteurs, la MDT et l'attention sont distinctes (Diamond, 2013 ; Houdé, 2018). De plus, l'attention ne se limite pas à la MDT, c'est un processus nécessaire dans les trois FE de base (Houdé, 2018). C'est pourquoi le modèle de Baddeley et Hitch (1974) sur la MDT est vu par d'autres auteurs (Diamond, 2013) comme ne se limitant pas à la MDT, au sens de la mise à jour d'informations retenues temporairement en mémoire afin de réaliser une tâche, mais comme décrivant le fonctionnement des FE en général.

D'autres modélisations de la MDT ont été élaborées. Cowan (2017) a réalisé une synthèse des définitions existantes, chacune menant à une modélisation propre de la MDT. Il est intéressant de noter que la MDT est passée d'un mécanisme de stockage temporaire de l'information (p. ex., Miller *et al.*, 1960) à un ensemble de processus permettant à la fois le stockage, le traitement et la manipulation des informations (p. ex., Baddeley, 2000 ; Daneman et Carpenter, 1980). Parmi les autres évolutions notables du concept de MDT et des modèles en découlant, il faut relever l'implication de la mémoire à long terme (p. ex., Ericsson et Kintsch, 1995). Ces modèles exposent que la MDT serait en fait la partie activée de la mémoire à long terme, c'est-à-dire ce qui est considéré comme la mémoire dans le langage commun. Il n'y aurait pas un

mécanisme de stockage séparé pour les informations pertinentes pour la tâche en cours. Enfin, plus récemment, sont apparus les modèles attentionnels. Par exemple, Engle (2002) pose que la MDT se limite aux processus de direction de l'attention et de contrôle des interférences, afin de garder son objectif présent à l'esprit. Le stockage temporaire des informations est considéré comme essentiel, mais étranger à la MDT.

Ces différents modèles permettent de comprendre que les contours du concept de MDT ne sont pas parfaitement définis, notamment concernant les liens avec l'attention et la mémoire à long terme. Cependant, tous les modèles s'accordent aujourd'hui sur le fait que la MDT est un processus cognitif à capacité limitée de manipulation de l'information (Miyake *et al.*, 2000). C'est la conceptualisation retenue pour ce travail. Elle est nécessairement un compromis qui laisse de côté certains aspects des définitions existantes, mais réunit les éléments essentiels des différentes conceptualisations en plus d'être la conceptualisation la plus largement utilisée dans les études d'entraînement cognitif.

En résumé, la MDT permet le traitement des stimuli selon leur nature, afin de les manipuler et non de simplement les stocker.

2.1.1.2.2 Contrôle inhibiteur

Le contrôle inhibiteur (CI), appelé aussi inhibition, est la « capacité à inhiber délibérément les réponses dominantes, automatiques ou prépondérantes, lorsque nécessaire » [traduction libre] (Miyake *et al.*, 2000, p. 57 ; Miyake et Friedman, 2012), c'est-à-dire la capacité à bloquer, résister, contrôler ces réponses dominantes. Cela signifie que, dans une situation précise, l'individu va s'empêcher de produire un comportement mental ou moteur (Diamond, 2013) qui est sa réponse usuelle. Par exemple, comparer des nombres à deux chiffres nécessite d'inhiber la réponse prépondérante acquise qui consiste à chercher le chiffre le plus grand pour identifier le nombre le plus grand en négligeant la position du chiffre dans le nombre, menant par

exemple à dire que 19 est plus grand que 22. Ainsi, le CI est le moyen de résister aux habitudes, aux automatismes, aux comportements non réfléchis, aux comportements intuitifs (Diamond, 2013 ; Houdé, 2017).

Comme il a été mentionné plus tôt, le CI peut être divisé en plusieurs sous-processus inhibiteurs. Les plus communément admis sont le contrôle attentionnel, le contrôle d'interférences et l'autocontrôle (Diamond, 2013). Le contrôle attentionnel est la capacité à diriger l'attention volontairement, ce qui suppose d'ignorer les stimuli externes non pertinents pour la tâche en cours (Diamond, 2013). Plus précisément, ce type d'inhibition vise à ignorer des stimuli naturellement attractifs pour notre attention, notamment du fait de leur saillance (Posner et DiGirolamo, 1998). Ainsi, le contrôle attentionnel permet de s'empêcher de réagir aux stimuli saillants qui ne seraient pas pertinents pour la tâche en cours, comme la taille des objets quand il faut dénombrer des ensembles. Le contrôle d'interférences est la capacité de résister à des éléments d'information internes pour rester concentré (Diamond, 2013), comme ne pas se laisser déconcentrer par les souvenirs ou les connaissances que chaque mot qu'on lit peut rappeler pour rester concentré sur le texte. Il est pertinent de noter que le contrôle attentionnel et le contrôle d'interférences vont agir de concert avec la mémoire de travail pour permettre de rester concentré sur un objectif. Bien que CI et mémoire de travail soient — le plus souvent — présentés comme deux FE séparées, elles manifestent un certain degré d'interdépendance, où le CI fait office de facilitateur pour la mémoire de travail (Diamond, 2013). Enfin, l'autocontrôle permet de contrôler son comportement et l'expression de ses émotions (Diamond, 2013). Il s'agit d'inhiber, de résister à la tentation, à la pulsion de satisfaire l'envie du moment lorsque c'est inapproprié, donc d'agir de façon non contrôlée. Par exemple, rester assis sur une chaise pendant un temps défini par une autre personne demande de l'autocontrôle.

La défaillance du CI entraîne la production de comportements mentaux ou moteurs indésirables sur le moment (Diamond, 2013). Par exemple, en classe, il est demandé

aux enfants de lever la main avant de prendre la parole. C'est un comportement inhabituel, non appris et non renforcé à la maison. En conséquence, cela exige des enfants de résister à leur habitude de parler dès qu'ils ont quelque chose à dire, d'inhiber leur automatisme, ce qui peut échouer et mener à des prises parole intempestives. Autrement dit, lors de la production de comportements mentaux ou moteurs inappropriés, indésirables, il est possible que la personne possède la réponse attendue, mais ait été dans l'incapacité de la produire par défaut de CI (Houdé, 2018). L'explication de ce phénomène fournie par Houdé (2018) est la compétition entre les différentes réponses possibles, l'automatique, prépondérante ou habituelle mais indésirable, et celle souhaitée, demandant d'inhiber la première. Il précise alors que, dans cette situation, il s'agirait plutôt d'apprendre à inhiber « la notion concurrente et interférente » plutôt que de se concentrer sur le contenu notionnel qui serait alors déjà maîtrisé (Houdé, 2018, p. 37).

Ce point est particulièrement important lorsqu'il s'agit d'enfants, car leur CI, comme les autres FE, se développe progressivement pendant l'enfance et l'adolescence (Diamond, 2013). Cela signifie qu'il est moins performant que celui des adultes. Plus encore, plus les enfants sont jeunes, moins leur niveau de CI est élevé (Diamond, 2002).

Ainsi, le CI est un processus permettant de résister cognitivement aux interférences, internes ou externes, pour permettre l'atteinte d'un objectif, ou en soutien à la mémoire de travail.

2.1.1.2.3 Flexibilité cognitive

La flexibilité cognitive (FC) est la troisième FE de base. Il s'agit de la « capacité à alterner entre des tâches, des opérations ou des ensembles mentaux » [traduction libre] (Miyake *et al.*, 2000, p. 55 ; Miyake et Friedman, 2012). Cela suppose de désengager l'attention des processus non pertinents pour la tâche ou l'opération mentale en cours, et de l'engager sur ceux qui lui sont liés (Miyake *et al.*, 2000). En conséquence, la FC

est aussi appelée changement ou alternance d'ensembles mentaux en référence à son rôle dans l'alternance attentionnelle, ou de tâches. L'attention est entendue ici comme orientation interne de l'attention (Miyake *et al.*, 2000), et non l'attention portée aux stimuli environnementaux qui ne relève pas de la FC (Moulden *et al.*, 1998).

Diamond (2013) présente la FC de façon plus large. Selon elle, il s'agit de la capacité à « changer de perspective spatialement ou sur le plan interpersonnel, changer de façon de penser sur un sujet donné, capacité à s'ajuster aux demandes et priorités changeantes, d'admettre son erreur et de saisir une opportunité » [traduction libre] (Diamond, 2013, p. 149). Cette vision large de la FC inclut, en plus de la capacité à alterner entre des tâches ou ensembles mentaux, la capacité à voir les choses sous un angle nouveau, à prendre un nouveau point de vue, au sens littéral ou abstrait, alors que la définition restreinte de la FC, donc la capacité à alterner entre les tâches ou ensembles mentaux, ne suppose aucunement une capacité à adopter un point de vue étranger. En conséquence, Diamond (2013) établit un lien entre la FC et la créativité.

De la même façon que le contrôle inhibiteur est lié à la mémoire de travail, tel qu'exposé plus tôt, il est aussi lié à la FC (Diamond, 2013). Pour parvenir à alterner entre des ensembles mentaux ou des tâches, ou même encore à adopter un nouveau point de vue, il faut exercer son contrôle inhibiteur. Autrement dit, arrêter de faire une tâche pour passer à une autre demande de supprimer la focalisation sur la première tâche, et changer de point de vue nécessite de résister à la force de notre façon de penser habituelle.

Comme les autres FE, la FC connaît un développement progressif pendant l'enfance et l'adolescence (Diamond, 2013). En conséquence, les enfants manifestent plus de difficulté à alterner entre des tâches ou des règles que les adultes (Diamond, 2013). Avant sept ans environ, les évaluations sur un vaste ensemble de tâches suggèrent que la persistance est plus la règle que la flexibilité (Davidson *et al.*, 2006). Cependant, il

faut relever que l'aspect moteur se développerait plus rapidement que l'aspect purement cognitif (Diamond, 2013). Autrement dit, il serait plus facile pour des enfants de changer de tâches physiques que de règles mentales.

La FC, dernière FE de bas niveau, permet donc l'alternance entre des tâches motrices ou mentales, de façon à s'adapter aux exigences de l'environnement. La présentation de ces trois FE permet de mieux comprendre le rôle de chacune dans le fonctionnement cognitif humain, et notamment les limites, surtout chez des enfants. Il ressort aussi de ces explications que ces trois FE ne semblent pas indépendantes les unes des autres. Les liens qui les unissent sont donc un point important à explorer aussi, d'autant que plusieurs conceptions existent. Les organisations des FE présentées à la section suivante exposent les différentes approches de ces liens.

2.1.2 Différentes organisations des fonctions exécutives

Le fonctionnement cognitif humain repose donc sur trois FE de base, la mémoire de travail, le contrôle inhibiteur et la flexibilité cognitive, qui peuvent aussi fonctionner de concert pour permettre des FE de haut niveau comme la planification (Diamond, 2013). Cependant, leur organisation reste encore hypothétique. Généralement considérées comme trois FE distinctes, indépendantes, des études suggèrent une certaine unité des trois FE (Friedman *et al.*, 2008 ; Miyake *et al.*, 2000). De plus, certains auteurs suggèrent que, pendant leur développement, l'organisation des FE serait différente, autrement dit, elle différencierait chez les enfants et les adultes. Un état des connaissances sur cette question donnera un aperçu des motifs de création de chaque forme d'organisation, et ce que chacune implique.

2.1.2.1 Organisation à trois fonctions exécutives indépendantes

L'organisation la plus commune (Friedman et Miyake, 2017 ; Miyake *et al.*, 2000) est celle à trois FE dissociées, dans laquelle la mémoire de travail, le contrôle inhibiteur et

la flexibilité cognitive sont présentés comme indépendants les uns des autres (p. ex., Diamond, 2013 ; Smith et Jonides, 1999).

Cette conception découle notamment d'observations cliniques. Des personnes ayant une lésion cérébrale dans une région liée aux FE ou une pathologie affectant une FE échouent aux tâches d'évaluation de cette FE. Cependant, ils réussissent les tâches qui sollicitent les autres FE (Godefroy *et al.*, 1999 ; Stuss et Alexander, 2007). Or, si un seul mécanisme gérait les trois FE, alors toute pathologie affectant ce mécanisme affecterait également les trois FE. Cela signifie que leur pathologie les empêche de recourir à une seule FE, mais pas à toutes, ce qui soutient l'idée que ce sont des processus séparés (Miyake *et al.*, 2000).

Les études de différences individuelles s'intéressant aux FE corroborent cette organisation. L'étude des différences individuelles est un procédé de recherche qui s'intéresse aux différences stables entre les individus d'une même population, par exemple les enfants ayant un trouble de l'apprentissage, en recourant à de nombreux outils d'évaluation (Juhel, 1999 ; Miyake *et al.*, 2000). Dans ce cadre, les équipes de recherche observent si les performances aux différentes tâches évaluant les FE sont corrélées. Les résultats renforcent les observations cliniques : de façon constante, les corrélations entre les scores à différentes tâches cognitives évaluant des FE différentes sont moyennes, et ce, à travers diverses populations (p. ex., Lehto, 1996). Si les trois FE n'étaient pas indépendantes, alors les corrélations devraient être très élevées. En conséquence, ces résultats supportent l'idée que les trois FE de base ne forment pas une seule FE, mais plutôt qu'elles sont indépendantes les unes des autres (Miyake *et al.*, 2000).

Enfin, cette organisation à trois FE distinctes est aussi celle mise de l'avant par les études recourant à la technique statistique de l'analyse factorielle. Cette technique permet, de façon exploratoire ou sur la base d'hypothèses préalables, de regrouper des

variables qui partagent une part importante de variance, qui sont donc fortement corrélées entre elles, par exemple les scores à différentes tâches évaluant les FE. Autrement dit, ces variables forment un sous-ensemble relativement cohérent, différenciable d'autres sous-ensembles de variables (Tabachnick *et al.*, 2019), c'est-à-dire que les scores partageant une part importante de variance sont regroupés, et que chaque groupe ainsi formé est distinct des autres. Le sous-ensemble ou groupe de variables corrélées entre elles forme un facteur, prétendu « refléter les processus sous-jacents qui ont créé les corrélations entre les variables » [traduction libre] (Tabachnick *et al.*, 2019, p. 326). Chaque facteur résume l'information provenant des variables qu'il regroupe. Cela signifie, dans le cadre des FE, que les facteurs dégagés par les analyses factorielles devraient être les FE. Concrètement, les scores aux tâches évaluant les FE qui ont été regroupés sur la base de leur variance commune rassemblent les tâches qui évaluent une seule FE. Ainsi, les analyses factorielles réalisées avec les scores aux tâches d'évaluation des FE font ressortir trois facteurs : la mémoire de travail, le contrôle inhibiteur et la flexibilité cognitive (p. ex., Burgess *et al.*, 1998). Ces trois facteurs sont donc considérés comme les trois processus distincts sous-jacents aux FE (Miyake *et al.*, 2000). Ainsi, l'idée de trois FE indépendantes est encore renforcée.

2.1.2.2 Modèle unité-diversité

Miyake et ses collaborateurs (2000) se sont interrogés sur la possibilité que différentes FE soient le reflet d'un même mécanisme sous-jacent. Autrement dit, ils ont émis l'hypothèse que les FE ne soient pas aussi séparées que la recherche avait l'habitude de le concevoir. Cette possibilité est fondamentalement pertinente, mais d'un intérêt tout particulier dans le cadre de la méta-analyse envisagée. Le caractère séparé ou non des FE pourrait affecter l'interprétation du transfert des effets d'un entraînement cognitif.

Les arguments de Miyake et ses collaborateurs (2000) concernant la possible non-séparabilité des FE reposent sur les limites des études qui tendent à prouver que les trois FE sont distinctes. Comme mentionné plus tôt, les études évaluant les FE à l'aide de batteries de tests trouvent des corrélations trop faibles entre les performances aux tâches pour considérer que les tâches évaluent la même chose : une seule FE.

Cependant, Miyake et ses collaborateurs (2000) soulèvent un problème important inhérent aux tâches d'évaluation des FE : l'impureté des tâches. Les tâches utilisées pour évaluer le fonctionnement cognitif ne peuvent pas évaluer qu'un seul processus cognitif. Toute tâche mobilise plusieurs processus cognitifs, voire plusieurs FE, dont certains ne sont pas pertinents dans le cadre de l'évaluation d'une FE donnée. Par exemple, la tâche de Stroop (Stroop, 1935) est fréquemment utilisée pour évaluer le contrôle inhibiteur (Miyake *et al.*, 2000). Cette tâche consiste à dire la couleur de l'encre avec laquelle sont écrits des mots. La difficulté vient du fait que ces mots sont des noms de couleur. La couleur de l'encre et le mot écrit sont identiques dans la condition congruente, alors qu'ils sont différents dans la condition incongruente. Or la lecture, pour les adultes alphabétisés, est un processus largement automatisé. Pour réaliser la tâche de Stroop en condition incongruente, il faut inhiber le réflexe de lire le mot pour être capable de dire la couleur de l'encre (Ward, 2010). Ainsi, cette tâche sert à évaluer le contrôle inhibiteur. Or, elle ne sollicite pas uniquement le contrôle inhibiteur. Cette tâche demande de lire et verbaliser la réponse le plus vite possible. Donc la tâche de Stroop mobilise des compétences en lecture, en énonciation verbale et en vitesse de traitement de l'information. Ces trois habiletés, pour lesquelles il existe de la variabilité interindividuelle, n'ont pas de liens directs avec le contrôle inhibiteur. Cela signifie que les différences de performances observées pourraient être affectées par les habiletés en lecture ou en énonciation verbale, ou encore par la vitesse de traitement de l'information. C'est pourquoi il est question d'impureté de la tâche (Miyake *et al.*, 2000). En conséquence, les faibles corrélations obtenues entre les tâches évaluant des FE différentes pourraient être la conséquence de l'impureté des tâches

utilisées. Autrement dit, ces faibles corrélations pourraient être biaisées par des éléments étrangers aux FE. Ainsi, la conclusion selon laquelle ces faibles corrélations signifient que les trois FE sont des processus distincts pourrait être erronée, et est en tout cas incertaine (Miyake et Shah, 1999).

Miyake et ses collaborateurs (2000) soulèvent un autre point litigieux concernant ces tâches. Les batteries de tests utilisées pour évaluer le fonctionnement cognitif se composent de tâches très largement utilisées et qui, pourtant, ont une faible fidélité interne et test-retest (Rabbitt, 1997). La fidélité interne d'un instrument de mesure, comme une tâche d'évaluation cognitive, est son degré de constance dans les résultats d'une personne pour tous les éléments mesurant la même chose (Hogan, 2007). Autrement dit, une tâche évaluant la mémoire de travail doit le faire de façon constante à travers les mesures. La fidélité test-retest est la capacité de l'instrument à être stable dans son évaluation à travers les passations (Hogan, 2007). Concrètement, si un individu réalise une tâche d'évaluation cognitive à deux reprises, les deux mesures devraient être semblables (si aucun facteur extérieur ne vient perturber cette stabilité). Cela est aussi valable pour des passations réalisées auprès de personnes différentes ayant le même profil. Il faut que l'instrument donne des résultats proches pour deux personnes semblables. Or de mauvaises fidélités mènent à de faibles corrélations avec d'autres mesures (Miyake *et al.*, 2000). Autrement dit, les faibles corrélations observées ne seraient, à nouveau, pas forcément liées au caractère dissociable des trois FE, mais potentiellement à des problèmes dans l'élaboration des tâches les évaluant.

Les auteurs ajoutent encore que, pour plusieurs tâches, la validité de construit demeure incertaine (Miyake *et al.*, 2000). La validité de construit est la capacité d'un instrument à mesurer ce qu'il est supposé mesurer (Hogan, 2007). Autrement dit, une tâche présentée comme mesurant le contrôle inhibiteur doit mesurer effectivement le contrôle inhibiteur, et non une autre fonction exécutive. En ayant une faible validité de construit, il se peut que ces instruments n'évaluent pas la bonne FE.

Pour répondre à cette interrogation, Miyake et ses collaborateurs (2000) ont réalisé des analyses factorielles confirmatoires dites de variable latente, suivis par d'autres équipes, Karr et ses collaborateurs (2018) réalisant une synthèse de ce champ de recherche. Ils sont partis de l'hypothèse qu'il y a trois facteurs dissociés expliquant les FE : mémoire de travail, contrôle inhibiteur et flexibilité cognitive. Ils ont ensuite examiné si les données correspondaient au modèle postulé. Les analyses réalisées permettent de faire ressortir la variance commune à travers les différentes mesures, en excluant la variance sans liens avec les FE (Friedman et Miyake, 2017). Concrètement, cette procédure permet de contourner les problèmes de fidélité et d'impureté des tâches (Friedman et Miyake, 2017). Ils ont ainsi observé qu'il y a bien trois facteurs distincts, mais non indépendants ($r = 0,42$ à $r = 0,63$). Cela suggère, d'après ces analyses statistiques, que la mémoire de travail, le contrôle inhibiteur et la flexibilité cognitive partagent leur fonctionnement, tout en ayant une certaine séparabilité (Friedman et Miyake, 2017). Ainsi, selon ces données, chaque FE recourt, dans une certaine mesure, à des processus différents, tout en en partageant d'autres, d'où l'expression unité-diversité.

À partir des constats statistiques de Miyake et ses collaborateurs (2000), un modèle bifactoriel novateur a été dégagé (Friedman *et al.*, 2008). Au lieu de faire une séparation des facteurs en se basant sur les processus comme cela se faisait ordinairement (mémoire de travail, contrôle inhibiteur et flexibilité cognitive), Friedman et ses collaborateurs (2008) ont choisi de distinguer les facteurs en fonction de ce qui est commun aux trois FE et de ce qui leur est spécifique (comme présenté dans la Figure 2.1). Ils ont obtenu un facteur unitaire qui rassemble tous les processus fortement corrélés, peu importe la FE à laquelle ils renvoient dans les modèles théoriques, et des facteurs spécifiques pour les éléments faiblement corrélés. Ils obtiennent ainsi deux facteurs spécifiques, un premier qui se compose de processus exclusifs à la mémoire de travail, et un second pour des processus exclusifs à la flexibilité cognitive. Il faut noter ici qu'il n'y a aucun facteur spécifique pour le contrôle inhibiteur. Cela signifie que tous les processus du contrôle inhibiteur relèvent

du facteur commun (Miyake et Friedman, 2012). Cette impossibilité à extraire un facteur spécifique pour le contrôle inhibiteur a été répliquée avec d'autres données (Ito *et al.*, 2015).

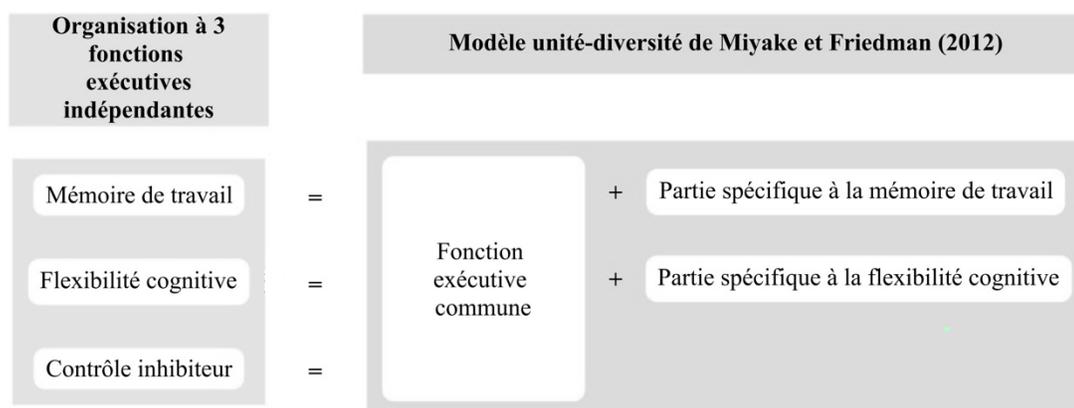


Figure 2.1. Représentation schématique de l'organisation à trois FE indépendantes par rapport au modèle unité-diversité de Miyake et Friedman (2012). Adapté de « Individual differences in executive functions », par Miyake, A. et Friedman, N. P., 2012, *Current Directions in Psychological Sciences*, 21(1), p. 11.

Plusieurs interprétations de l'absence de facteur spécifique au contrôle inhibiteur sont possibles. Pour certains auteurs, cela suggère que le contrôle inhibiteur est le facteur commun des FE (p. ex., Valian, 2015). Autrement dit, tout ce qui est commun ne serait que contrôle inhibiteur. D'autres auteurs (p. ex., Hall et Fong, 2015), plus pondérés, suggèrent que le contrôle inhibiteur est la FE la plus centrale, et que des facteurs distincts se développeraieent pour des processus spécifiques de mémoire de travail et de flexibilité cognitive. Pour d'autres, à l'inverse, ces résultats montrent que le contrôle

inhibiteur n'est pas forcément une FE puisqu'il se retrouverait dans un ensemble varié de processus cognitifs ayant une manifestation inhibitrice (Friedman et Miyake, 2017).

Dans le cadre d'une analyse des effets de transfert suite à des entraînements des FE, la possibilité que les FE soient organisées en un facteur commun, qui englobe intégralement le contrôle inhibiteur, accompagné de deux facteurs spécifiques, ne serait pas sans conséquence. Bien que le modèle à trois FE séparées soit le plus fréquent dans les études d'entraînement cognitif, il sera éventuellement intéressant d'interpréter les résultats à l'aune d'une organisation à facteur commun des FE. Cela sera particulièrement valable pour la question du transfert des bénéfices d'un entraînement d'une FE à une autre.

Ainsi, l'organisation des FE demeure encore incertaine. Les trois processus à l'étude sont très liés tout en n'étant pas superposables. Autrement dit, ils partagent leur fonctionnement, mais pour certains aspects sont très spécifiques et donc exclusifs. Pour ajouter au flou, des modélisations récentes remettent en cause la conceptualisation même des FE en postulant qu'il y a en fait un facteur commun et des facteurs spécifiques, plus que des FE distinctes, et de surcroît aucun facteur spécifique pour le contrôle inhibiteur.

2.1.2.3 Cas particulier des jeunes enfants

Il existe donc deux visions de l'organisation des FE : soit celle où les trois FE de base mémoire de travail, contrôle inhibiteur et flexibilité cognitive sont indépendantes (Diamond, 2013), soit celle où elles sont très interreliées (Miyake *et al.*, 2000), voire avec un facteur commun aux trois FE complété de deux facteurs séparés pour la mémoire de travail et la flexibilité cognitive (Friedman *et al.*, 2008). Cependant, ces conceptions concernent des FE développées ou quasiment développées. Considérant les différences développementales qui existent au niveau du fonctionnement cérébral

chez l'enfant (Diamond, 2002), des scientifiques se sont interrogés sur l'organisation des FE au début de leur développement. Cette question est particulièrement intéressante dans le cadre de ce projet de recherche. Pour chercher à mieux définir l'impact d'un entraînement cognitif chez les enfants et adolescents, il faut prendre en considération leurs différences. Leur capacité et leur façon de recevoir l'entraînement peuvent en être affectées. Cet éclaircissement pourrait aider à mieux cerner les effets des entraînements auprès d'élèves selon leur stade de développement cérébral.

Les études qui se sont spécifiquement intéressées aux jeunes enfants aboutissent à différents patrons organisationnels des FE, avec un point commun : les FE seraient moins différenciées (Espy *et al.*, 2004). Avant tout, il faut préciser ce qui est entendu par la notion de jeunes enfants. Bien qu'il n'y ait pas d'âge précis servant de critère pour toutes les études, la séparation des groupes d'enfants est généralement assez semblable. Les équipes de recherche recourent à l'ordre d'enseignement. Dans la catégorie jeunes enfants, ils incluent le plus souvent ceux qui ne sont pas encore entrés à l'école, donc qui ont six ans ou moins (p. ex., Senn, Espy et Kaufmann, 2004), certains allant jusqu'à 8 ans (Brydges *et al.*, 2014). Ce choix repose sur les facteurs développementaux du fonctionnement cérébral (Diamond, 2002).

Ainsi, chez les jeunes enfants, c'est-à-dire chez des individus ayant des FE en cours de développement (Diamond, 2002), l'organisation des FE serait différente et tendrait vers des FE peu distinctes les unes des autres. Pour Espy et ses collaborateurs (2004), ce serait la mémoire de travail et le contrôle inhibiteur qui seraient les plus interreliés. Concrètement, cela signifie que lors des tâches devant recourir au contrôle inhibiteur, les enfants d'âge préscolaire auraient tendance à utiliser autant leur mémoire de travail que leur contrôle inhibiteur, alors que les adultes et les enfants plus âgés utiliseraient uniquement leur contrôle inhibiteur. Et inversement pour les tâches recourant à la mémoire de travail. Ainsi, les enfants de moins de sept ans, environ, n'auraient pas encore développé un processus pleinement spécifique pour la mémoire de travail et un

autre pour le contrôle inhibiteur. Ces deux processus auraient tendance à travailler conjointement. Camerota et ses collaborateurs (2018) ont confirmé le rôle primordial du contrôle inhibiteur et de la mémoire de travail chez les enfants d'âge préscolaire. Ils ont réalisé une analyse factorielle qui les mène à conclure que la flexibilité cognitive, en tant que processus cognitif spécifique, est absente à cet âge. Cependant, ils obtiennent tout de même deux facteurs distincts pour la mémoire de travail et le contrôle inhibiteur. Cela suggère que la mémoire de travail et le contrôle inhibiteur sont plus dépendants l'un de l'autre qu'indifférenciés, même à ce jeune âge, alors que la flexibilité cognitive est encore indifférenciée. Cette idée est en contradiction avec la conclusion d'autres auteurs (Brydges *et al.*, 2014 ; Wiebe *et al.*, 2008) selon laquelle il y aurait seulement un facteur unitaire chez les jeunes enfants, quel que soit le sexe ou le statut socio-économique. Selon la conception du facteur unitaire chez les plus jeunes, les enfants avant six ans auraient un processus exécutif indifférencié qui assurerait toutes les tâches de fonctionnement exécutif, que cela relève de la mémoire de travail, du contrôle inhibiteur ou de la flexibilité cognitive. Cette idée est en accord avec un niveau de différenciation moindre chez les jeunes enfants (Espy *et al.*, 2004 ; Senn *et al.*, 2004), tout en étant cohérent avec le modèle unité-diversité (Miyake *et al.*, 2000) ou bifactoriel des FE chez l'adulte (Friedman *et al.*, 2008). Ainsi, dans cette conception unitaire développementale, avant l'âge de sept ans environ, les enfants n'auraient que le facteur commun des FE. Le développement des facteurs spécifiques pour la mémoire de travail et la flexibilité cognitive serait plus tardif (Friedman et Miyake, 2017).

Certains auteurs soulèvent un point important qui pourrait être à l'origine de la conception de FE indifférenciées chez les jeunes enfants (Monette et Bigras, 2008; Senn *et al.*, 2004). L'impureté des tâches d'évaluation des FE chez les jeunes enfants a peut-être un impact plus grand et au-delà de celui observé chez les adultes. Leur hypothèse est que maintenir les règles présentes à l'esprit demande beaucoup plus d'efforts cognitifs à de jeunes enfants du fait de la moins grande capacité de leurs FE. Ainsi, ils doivent, par exemple, avoir recours à la mémoire de travail dans une tâche

qui ne l'évalue pas afin de retenir et d'actualiser les règles de la tâche. En conséquence, il se pourrait que l'indifférenciation des FE chez les jeunes enfants soit plutôt une incapacité de la plupart des tâches d'évaluation des FE à évaluer correctement les FE chez les plus jeunes. Ainsi, les FE des jeunes enfants pourraient tout de même être différenciées, bien que les instruments de mesure ne soient pas toujours capables de le détecter. Cela est en accord avec les recherches qui observent que certaines FE sont déjà différenciées chez les jeunes enfants, notamment la mémoire de travail et le contrôle inhibiteur (Camerota *et al.*, 2018).

Il ressort de cet exposé qu'il n'y a pas de consensus sur l'organisation des FE chez le jeune enfant. Du fait de la phase développementale des FE (Diamond, 2002) et des résultats de différentes études évaluant les FE (p. ex., Camerota *et al.*, 2018 ; Espy *et al.*, 2004), la communauté scientifique semble d'accord pour dire que l'organisation des FE chez le jeune enfant est différente de celle chez l'adulte. Cette différence tend vers moins de différenciation des FE (p. ex., Brydges *et al.*, 2014 ; Senn *et al.*, 2004 ; Wiebe *et al.*, 2008). Cette moindre différenciation pourrait cependant être essentiellement liée aux capacités de mesure des instruments utilisés, menant à une moindre différenciation observable mais pas nécessairement réelle.

2.1.2.4 Choix du modèle retenu et justification

Le but du travail envisagé est de dégager, de multiples études expérimentales, les effets d'entraînements cognitifs variés sur les FE. Savoir si ces FE sont séparées selon la conception traditionnelle mémoire de travail, contrôle inhibiteur et flexibilité cognitive ou selon la conception plus récente facteur unitaire, facteur spécifique à la mémoire de travail et facteur spécifique à la flexibilité cognitive est crucial pour interpréter correctement les résultats. Cependant, les mesures des effets des entraînements sur le fonctionnement cognitif sont réalisées avec des tâches standardisées (Diamond, 2013), ces mêmes tâches qui ont été utilisées pour conclure à la présence de trois FE de base

(Diamond, 2013 ; Smith et Jonides, 1999). En conséquence, lors d'une étude d'entraînement cognitif, il serait inapproprié d'utiliser le modèle bifactoriel d'organisation des FE (Friedman *et al.*, 2008), car il serait par exemple impossible de déterminer si une tâche de mémoire de travail ou de flexibilité cognitive devrait être reliée au facteur unitaire ou au facteur spécifique. Cela mènerait à une incapacité à dégager des résultats. La façon dont sont évaluées les FE dans les études expérimentales contraints à conserver le modèle d'organisation des FE à trois FE séparées, afin de pouvoir utiliser les résultats de ces études.

Il est toutefois important de mentionner qu'il serait pertinent de chercher à savoir si l'organisation bifactorielle des FE ne serait pas plus en adéquation avec la réalité, notamment dans le cadre de l'évaluation des entraînements cognitifs. Persister à utiliser le modèle d'organisation à trois FE séparées limite peut-être l'interprétation des effets observés lors de ces entraînements. Concevoir chaque FE indépendamment des deux autres dans un programme d'entraînement ou concevoir un facteur commun qui englobe tous les processus inhibiteurs et une partie des processus de mémoire de travail et de flexibilité cognitive devrait mener à élaborer des entraînements différents et à des interprétations différentes des résultats. Cela démontre qu'il y a un besoin de recherche pour tester concrètement le modèle bifactoriel d'organisation des FE.

Concernant la méta-analyse envisagée ici, l'analyse des résultats des études d'entraînement cognitif se fera en appliquant le modèle à trois FE séparées. Cela se justifie par l'utilisation massive de ce modèle dans ces études, du fait des contraintes d'évaluation des FE. Cependant, lors de l'interprétation de ces analyses, il sera éventuellement pertinent d'en appeler au modèle bifactoriel. En somme, le modèle bifactoriel n'est pas rejeté pour le présent travail. Il sera utilisé conjointement avec le modèle à trois FE séparées dans la phase d'interprétation.

Ainsi, l'organisation des FE a été modélisée à plusieurs reprises menant à un nombre de FE variables à travers les modèles. Cependant, elle demeure incertaine. Cela a possiblement un impact sur l'élaboration des entraînements cognitifs et l'interprétation de leurs résultats. C'est la raison pour laquelle cette diversité sera prise en compte dans l'interprétation des résultats.

2.1.3 Évaluations et entraînements des fonctions exécutives

Afin de mieux comprendre les aspects concrets des entraînements cognitifs, il semble nécessaire d'aborder de façon plus systématique, bien que non exhaustive, que ce qui a été fait plus tôt, comment peuvent être évaluées et entraînées les FE.

2.1.3.1 Évaluation des fonctions exécutives

Afin de bien cerner, à un niveau plus pratique, ce que sont les entraînements cognitifs, il convient de s'intéresser à deux aspects centraux : les entraînements en eux-mêmes et les évaluations des FE. Chacun repose sur des tâches choisies, voire élaborées, par les équipes de recherche. Leur nature peut être semblable, mais le moment et le but de leur emploi diffèrent.

Dans le cadre de l'évaluation, il s'agit de déterminer le niveau d'efficacité d'une ou plusieurs FE, idéalement avant et après l'entraînement. Cela permet d'observer s'il y a eu un progrès ou non des FE évaluées suite à l'entraînement. Les tâches d'évaluation sont donc les outils permettant éventuellement de montrer une amélioration causée par l'entraînement.

Les tâches utilisées dépendent de la FE évaluée et de l'âge de l'enfant. Pour la mémoire de travail, les tâches d'empan sont les plus fréquentes (Diamond, 2013). Elles reposent sur la mémorisation et la manipulation d'une quantité finie d'éléments à rappeler (Alloway et Copello, 2013). Dans sa forme la plus simple, la personne évaluée entend

une série de chiffres. Elle doit ensuite dire les chiffres entendus dans l'ordre inverse ou dans un ordre précis, par exemple du plus petit au plus grand. Cela peut se faire avec les modalités auditive (on entend les items à rappeler) ou visuelle (l'évaluateur montre les items à rappeler). Ces tâches d'empan sollicitent essentiellement la mémoire de travail puisqu'elles supposent de mémoriser temporairement une petite quantité d'informations puis de manipuler ces informations avant de les utiliser (Miyake *et al.*, 2000), c'est-à-dire les redonner à l'évaluateur. La difficulté est augmentée graduellement, en règle générale on ajoute un item de plus à chaque essai réussi. On teste ainsi les limites individuelles de la mémoire de travail : quand la personne évaluée ne parvient plus à redonner correctement les informations, c'est qu'il y en avait trop pour sa mémoire de travail. Cependant, ces tâches d'empan ne sont pas tout à fait représentatives de la réalité, car la quantité d'information à retenir est toujours finie et la personne évaluée le sait. C'est pourquoi elles sont souvent complexifiées (Daneman et Carpenter, 1980), c'est-à-dire qu'on va ajouter une charge cognitive. Par exemple, demander de mémoriser et rappeler ultérieurement des mots qui sont présentés en alternance avec des phrases à lire et comprendre (Kane *et al.*, 2007). Un autre type de tâche fréquent jugé plus complexe que les tâches d'empan classique est la tâche dite *n-back* (Diamond, 2013). Plutôt que de rappeler une quantité finie d'éléments, l'enfant doit redonner un seul élément vu ou entendu plus tôt, alors que d'autres éléments ont continué à lui être présentés. La difficulté réside donc dans la capacité à se souvenir d'un item présenté plus tôt alors que d'autres informations ont été présentées depuis, comme cela arrive dans les tâches quotidiennes. En classe, l'élève doit parvenir à se souvenir de la question qu'il veut poser, en attendant son tour de parole, alors qu'il entend les autres questions posées. Comme pour les tâches d'empan, le niveau de difficulté peut être manipulé en augmentant ou diminuant le nombre d'items à rappeler. Concrètement, le niveau le plus simple est de demander le rappel du dernier item présenté. Après avoir présenté un nombre aléatoire d'items visant à empêcher les stratégies de mémorisation, on demande à nouveau de rappeler le dernier item présenté. Pour augmenter la difficulté, il sera demandé de rappeler les deux derniers items

présentés. La quantité d'items à rappeler peut être augmentée selon les besoins. La capacité de la mémoire de travail est alors déterminée en fonction du seuil de réussite de la personne évaluée, c'est-à-dire jusqu'à combien d'items en amont elle parvient à réussir la tâche de rappel. Il faut préciser que la tâche de *n-back* n'est pas utilisée avec les jeunes enfants (six ans et moins; Monette et Bigras, 2008).

Pour le contrôle inhibiteur, plusieurs types de tâches sont utilisées pour l'évaluation chez les enfants, leur point commun concerne le besoin d'inhiber une réponse dominante (Diamond, 2013). Dans la tâche de Stroop classique (Stroop, 1935), il faut dire la couleur de l'encre dans laquelle sont écrits des mots et non lire les mots, généralement des noms de couleurs, alors que la lecture est un automatisme acquis pour les lecteurs. La difficulté survient en situation incongruente, c'est-à-dire quand le sens du mot et la couleur de l'encre sont différents, par exemple écrire le mot bleu en rouge. Avec de jeunes enfants, la tâche est adaptée afin de ne pas recourir à la lecture. Il existe par exemple le Stroop animal où sont présentés à l'enfant des animaux composés d'une tête et d'un corps appartenant à deux animaux différents, comme une tête de vache et un corps de canard. L'enfant doit mentionner l'animal représenté par le corps et non la tête comme il aurait le réflexe de le faire (Wright *et al.*, 2003). Dans la tâche de Simon (Simon et Rudell, 1967), le but est d'appuyer sur un bouton à gauche pour un stimulus donné et un bouton à droite pour un autre stimulus donné. Ces stimuli, présentés sur un écran, peuvent apparaître n'importe où. Ce qu'il faut inhiber ici est la tendance à vouloir appuyer du côté où apparaît un stimulus sans considération du stimulus en question et donc du bouton qui lui est associé. Dans la tâche des distracteurs (aussi appelée tâche de Flanker; Eriksen et Eriksen, 1974), il faut indiquer la direction pointée par le stimulus cible, qui est accompagné de stimuli distracteurs. L'aspect inhibiteur survient quand le stimulus cible et les distracteurs ne pointent pas dans la même direction. Il faut résister à la tendance à répondre en fonction de ce que les stimuli les plus nombreux, et donc plus saillants, montrent. Il est encore possible de citer la tâche de go/no-go ou la tâche stop-signal (Logan, 1994), où la vitesse de réponse et le taux

d'exactitude constituent les paramètres principaux d'évaluation du contrôle inhibiteur. Plus les réponses seront rapides et exactes, plus le contrôle inhibiteur sera jugé performant. Dans d'autres tâches, qui sont essentiellement utilisées avec les jeunes enfants, comme la tâche du délai de gratification (Mischel, 1989) où il faut résister à faire quelque chose dont on a très envie, ou la tâche jour/nuit où il faut dire le contraire de ce qui est présenté sur une carte, la capacité à résister est évaluée à partir de la seule réponse sans paramètre de vitesse.

Concernant la flexibilité cognitive, les tâches d'évaluation peuvent demander aux participant·e·s d'alterner entre deux catégories. Par exemple, dans une tâche de tri de cartes destinée aux jeunes enfants (Zelazo *et al.*, 1996), on demande aux participant·e·s de mettre chaque nouvelle carte présentée dans la bonne pile selon la règle déterminée par l'évaluateur, c'est-à-dire selon la couleur ou selon la forme. Ensuite, l'évaluateur annonce qu'on inverse la règle. Il faut alors à nouveau trier les mêmes cartes, mais selon la nouvelle règle. La capacité à utiliser la nouvelle règle est alors un indice de flexibilité cognitive, car l'enfant sera parvenu à alterner entre deux règles. La difficulté peut être augmentée en faisant alterner les règles à l'intérieur d'un même bloc d'essais. Un autre type de tâche consiste à demander aux enfants de donner, dans un temps limité, le plus d'éléments répondant à une règle posée par l'évaluateur (Diamond, 2013), par exemple le plus de mots commençant par la lettre G ou le plus d'utilisations d'une table. Cela nécessite de trouver des exemples atypiques, inhabituels, et donc d'avoir la capacité de varier les points de vue. Plus la quantité de réponses sera élevée plus l'enfant sera jugé avoir une bonne flexibilité cognitive.

Il faut rappeler qu'il existe un problème d'impureté des tâches (Miyake *et al.*, 2000; Monette et Bigras, 2008). Concrètement, toutes les tâches d'évaluation cognitive présentent le problème de solliciter plusieurs processus cognitifs. Par exemple, la performance dans une tâche d'empan auditive évaluant la mémoire de travail pourra être affectée par la vitesse de traitement de l'information, la capacité à rester concentré

sur la tâche, à ne pas se laisser distraire par d'autres bruits, par des éléments visuels ou par des pensées. Ainsi, la performance dans la tâche pourra être modérée par des variables tierces sans lien direct avec la mémoire de travail. Il est aussi possible qu'une même tâche sollicite plusieurs FE à différents degrés, et encore plus chez les jeunes enfants puisque leurs FE sont moins développées (Monette et Bigras, 2008). En somme, ces tâches mobilisent essentiellement une FE, mais leur réalisation fait néanmoins appel à une ou plusieurs autres FE dans une moindre mesure. C'est le cas de la tâche de *n-back* qui est utilisée pour évaluer la mémoire de travail (Diamond, 2013). Elle recourt à des sous-composants de FE autres que la mémoire de travail, notamment au niveau de processus attentionnels. Il y a aussi les tâches pour lesquelles une discordance existe parmi les chercheurs quant à la FE qu'elles évaluent réellement. Par exemple, la Wisconsin card sorting task (Milner, 1964), similaire à la tâche de tri de cartes pour les plus jeunes décrite plus tôt (Zelazo *et al.*, 1996), et généralement utilisée pour évaluer la flexibilité cognitive, mobilise de façon aussi importante le contrôle inhibiteur (Buschbaum *et al.*, 2005). Selon les études, cette tâche est utilisée pour évaluer l'une ou l'autre de ces FE (Miyake *et al.*, 2000), nonobstant l'impact de la seconde FE sur la tâche. Il y a enfin certaines tâches où est remis en cause le fait qu'elles évaluent réellement une FE. C'est le cas de la tâche de Stroop (Stroop, 1935) employée pour évaluer le contrôle inhibiteur (MacLeod *et al.*, 2003) : une interprétation possible des résultats peut se faire sans le recours au contrôle inhibiteur. Tous ces exemples mettent en évidence le besoin de prendre du recul sur les données obtenues avec des tâches d'évaluation cognitives, de les mettre en perspective avec d'autres données, telles les données d'imagerie cérébrales, ou encore avec des modèles conceptuels ou théoriques.

Il ressort de cela que l'évaluation des FE n'est pas si aisée, puisqu'il s'agit d'évaluer des processus cognitifs généraux à l'aide de tâches comportementales. Dans le cadre de la méta-analyse, les tâches utilisées dans les études d'entraînement cognitif seront identifiées afin éventuellement d'affiner l'interprétation des résultats.

2.1.3.2 Entraînements des fonctions exécutives

Le second élément fondamental dans les études d'entraînement cognitif est l'entraînement en lui-même, c'est-à-dire les tâches que l'on a fait pratiquer aux participant·e·s dans le but d'améliorer une ou plusieurs FE. Ces entraînements sont variés, comme cela a déjà été mentionné. Il convient, ici, de distinguer plus systématiquement les types d'entraînement existants.

Le premier type d'entraînement, et le plus fréquent, est l'entraînement cognitif direct d'une ou plusieurs FE des participant·e·s. Dans ces entraînements (p. ex., Klingberg *et al.*, 2005 ; Thorell *et al.*, 2009), le protocole d'entraînement élaboré repose sur une ou plusieurs tâches que doivent réaliser les enfants, tâches devant faire travailler la ou les FE ciblées. Un format récurrent est l'entraînement informatisé (Diamond, 2012). Les participant·e·s réalisent les tâches d'entraînement sur un ordinateur, à la maison, en laboratoire ou à l'école. Les tâches peuvent être très basiques, c'est le cas lorsque l'entraînement se compose de tâches d'évaluation des FE comme la tâche de *n-back*. Les enfants vont donc, de façon répétée sur plusieurs jours, faire la ou les mêmes tâches. Les tâches peuvent aussi prendre la forme de jeux vidéo, leur forme s'inspire alors des tâches d'évaluation des FE pour être créées.

Dans ce type d'entraînement, il existe plusieurs approches de gestion du niveau de difficulté. Il est possible d'avoir un niveau de difficulté constant à travers les séances, c'est-à-dire que le niveau de difficulté est toujours le même. Un niveau de difficulté croissant prédéterminé est parfois utilisé. Cela signifie que le niveau de difficulté augmente selon un protocole fixé à l'avance sans se préoccuper des performances des participant·e·s. Il est enfin possible d'avoir un ajustement du niveau de difficulté en fonction des performances des participant·e·s. Autrement dit, le niveau de difficulté augmente si les performances s'améliorent et diminuent si les performances baissent. Cette approche adaptative aux performances des participant·e·s tendrait à donner de

meilleurs résultats, à cause de l'effort cognitif constant que cela demande, sans être décourageant (Diamond, 2014).

Un deuxième type d'entraînement est l'entraînement cognitif indirect d'une ou plusieurs FE des participant·e·s. Autrement dit, le protocole élaboré repose sur le travail, par les enfants, de fonctions ou processus éloignés des FE. Un exemple fréquent avec les adolescents est l'exercice physique (p. ex., Lakes et Hoyt, 2004). Concrètement, dans les tâches qui sont demandées aux participant·e·s, rien n'est lié directement aux FE. Le choix des tâches repose alors sur des liens supposés entre le fonctionnement des FE et les tâches sportives demandées. Ces liens sont similaires à ceux présents dans les tâches d'évaluation, mais de façon moins évidente. Autrement dit, les tâches sportives mobilisent aussi les FE (Diamond et Ling, 2016), mais de façon moins manifeste que dans les entraînements indirects. Une motivation à choisir les entraînements cognitifs indirects serait le contexte de réalisation plus valide d'un point de vue écologique, ainsi que le fait que ça travaille plusieurs processus cognitifs à la fois (Diamond et Ling, 2016).

Le troisième type d'entraînement retenu ici consiste à intervenir sur l'environnement, et non sur les participant·e·s. En somme, des variables précises de l'environnement des enfants sont modifiées dans le but d'améliorer les FE. Par exemple, le Chicago school readiness project a été élaboré et testé à cette fin (Raver *et al.*, 2011). Des enseignant·e·s ont reçu une formation complémentaire afin de modifier leurs interactions avec des élèves du préscolaire, dans le but d'améliorer les FE des enfants, notamment la capacité d'autocontrôle. Pour ce type d'entraînement, la fréquence et la durée sont généralement plus longues dans la mesure où ce sont des changements structurels à l'école ou en milieu de garde qui sont mis en place, et non des interventions ponctuelles.

Il faut compléter cette catégorisation des entraînements par des éléments communs aux trois types. Tout d'abord, concernant l'âge des participant·e·s, il n'y a pas de limite réelle. Les tâches pour les trois types d'entraînement sont adaptées en conséquence. Lorsqu'il y a un groupe contrôle, il peut être passif ou actif, et dans ce dernier cas, il existe différents degrés d'exigence dans l'activité réalisée avec le groupe contrôle. Parfois, l'activité est peu exigeante cognitivement ou sans lien avec l'entraînement cognitif, alors que dans d'autres études c'est le même entraînement que le groupe expérimental en version allégée. Sala et Gobet (2017) ont observé que les études avec des groupes contrôle actifs tendaient à avoir des tailles d'effet inférieures pour les entraînements cognitifs.

Cette synthèse des types d'entraînement vise à établir une catégorisation claire et simple de ce qui se fait en entraînement cognitif. Un avantage sera de pouvoir, éventuellement, utiliser cette catégorisation dans l'interprétation des résultats de la méta-analyse. Il est toutefois important de noter que certains types d'entraînements pourraient échapper à cette catégorisation. Elle ne prétend pas être exhaustive, bien qu'elle semble couvrir la plupart des types d'entraînements rencontrés. Enfin, comme mentionné plus tôt, l'entraînement cognitif et les tâches d'évaluation des FE constituent les deux éléments cruciaux des études d'entraînement cognitif qui seront explorées dans cette méta-analyse.

Ainsi, cette présentation des FE a permis de dégager les trois FE principales, à savoir la mémoire de travail, le contrôle inhibiteur et la flexibilité cognitive. Ces trois FE sont visées par l'entraînement cognitif, bien que ce soit plus souvent la mémoire de travail. Les différentes modélisations des FE permettent de mieux comprendre comment elles sont liées. Cela est particulièrement intéressant chez les jeunes enfants puisque les FE pourraient être moins différenciées. Cela pourrait avoir un impact sur l'interprétation des résultats des entraînements cognitifs. Cependant, la modélisation des FE n'est pas

le seul facteur influençant potentiellement les études d'entraînement. Le transfert d'apprentissage en est un aussi important, lequel fait l'objet de la section suivante.

2.2 Transfert d'apprentissage

Selon ce qui a été exposé précédemment, parvenir à entraîner les FE pourrait mener à améliorer leur efficacité. Considérant l'importance des FE dans la scolarité, leur rôle central dans tous les apprentissages, ce serait un avantage considérable pour les élèves de parvenir à favoriser le développement des FE. Comme cela a déjà été abordé, de nombreux auteurs se sont saisis de cette question en élaborant des programmes d'entraînement des FE. Cependant, l'efficacité des entraînements est contestée, car ils ne semblent pas produire de transfert d'apprentissage (p. ex., Sala et Gobet, 2017). Or, ce thème de recherche a pour lui une littérature abondante et contradictoire. Il convient donc de s'attarder à comprendre ce qu'est le transfert d'apprentissage et ses différentes opérationnalisations pour éclairer les résultats scientifiques variés et contradictoires sur le transfert d'apprentissage dans le cadre de l'entraînement cognitif. Ensuite, il faudra déterminer l'opérationnalisation retenue dans le cadre de cette recherche, c'est-à-dire en lien avec les programmes d'entraînement cognitif.

2.2.1 Définition du transfert d'apprentissage

De nombreuses définitions du transfert d'apprentissage ont été élaborées. Toutes cependant se ressemblent. Il s'agit de « l'usage fait de connaissances acquises dans une situation nouvelle. Influence, impact sur un apprentissage subséquent » (Legendre, 2005, p. 1402). Cette définition couvre deux facettes de ce qui est entendu par transfert d'apprentissage : le transfert en tant que processus, c'est-à-dire le réinvestissement des connaissances, et le résultat, c'est-à-dire l'avantage ou non pour les apprentissages ultérieurs. Les définitions se concentrent d'ailleurs généralement sur un seul de ces aspects. Certaines mettent l'accent sur le changement dans la performance. Pour

Perkins et Salomon (1992), le transfert d'apprentissage « survient lorsque l'apprentissage réalisé dans un contexte ou avec du matériel particulier influence la performance dans un autre contexte ou avec d'autres ensembles de matériel » [traduction libre] (p. 6454). D'autres auteurs préfèrent parler uniquement d'apprentissage, sans évoquer la performance qui en découlerait. « Le transfert renvoie à comment des apprentissages antérieurs influencent les apprentissages actuels et futurs, et comment les apprentissages passés et actuels sont appliqués et adaptés à des situations similaires ou nouvelles » [traduction libre] (Haskell, 2001, p. 23).

Certaines de ces définitions précisent que le nouveau contexte doit être différent, mais similaire à celui dans lequel l'apprentissage a été réalisé pour pouvoir en observer le transfert (Butterfield et Nelson, 1991 ; Haskell, 2001). C'est un point important qui nécessite de présenter l'évolution historique du transfert pour comprendre ce qui est entendu par similarité.

L'étude du transfert d'apprentissage fut d'abord le fait de psychologues (Taktek, 2017). C'est un concept dont il est explicitement question en recherche depuis le début du 20^e siècle (Barnett et Ceci, 2002). Thorndike et Woodworth (1901) s'interrogeaient sur la possibilité d'observer des effets positifs d'un apprentissage dans d'autres domaines. Dans une de ses expériences, Thorndike (1923) partit de l'idée, répandue à cette époque, que l'apprentissage du latin favorisait le développement de la pensée rationnelle, et donc facilitait les apprentissages dans des matières scolaires comme les mathématiques. Il n'aboutit à rien de concluant, infirmant donc cette hypothèse. Cependant, la recherche sur le transfert d'apprentissage, ses caractérisations, les conditions favorisant ses manifestations, était lancée. À cette époque, Thorndike et Woodworth (1901) employèrent l'expression « effet d'expansion » [traduction libre] et non transfert. L'idée sous-jacente est cependant la même : un premier apprentissage voit son impact s'étendre au-delà du contexte et du contenu particuliers à un

apprentissage. Ils postulent, d'après leurs résultats, que des éléments des deux situations d'apprentissage doivent être identiques pour qu'il y ait effet d'expansion.

Plus tard, des scientifiques du courant behavioriste, tel Skinner (Cyr, 2012), emploieront le terme « généralisation » pour signifier que l'apprentissage initial finit par s'appliquer à d'autres situations où il n'y a pourtant pas eu d'apprentissage. Cela découle directement des recherches sur le conditionnement classique menées par Pavlov, et celles sur le conditionnement opérant menées par Skinner. Par association avec un stimulus qui produit une réaction typique de façon inconditionnelle, un stimulus neutre finit par produire cette même réaction. Par exemple, administrer une légère décharge électrique à un rat (stimulus inconditionnel) le fait fuir (réponse inconditionnelle). Si une ampoule se met à clignoter avant chaque décharge, constituant le stimulus conditionnel, le rat va faire une association avec la décharge électrique. Après un certain nombre de répétitions, la seule vue de l'ampoule clignotante suffira à le faire fuir, même en l'absence de décharge électrique. C'est l'apprentissage. La généralisation survient quand la réponse inconditionnelle, ici la fuite, est produite à la suite de stimuli ressemblant au stimulus conditionnel, comme un flash lumineux ou une ampoule qui ne clignote pas, alors qu'il n'y a pas eu d'association avec la décharge électrique. L'animal a extrapolé, par lui-même, ce qu'il a appris, à des contextes proches, ce qui correspond à du transfert d'apprentissage.

Pour la Gestalt, autre courant de psychologie, le terme retenu fut « transposition » (Cyr, 2012). En somme, il s'agit d'appliquer des connaissances antérieures à un autre contexte, à d'autres contenus. Par exemple, un animal découvre et apprend qu'une récompense est toujours cachée derrière le plus grand de deux cercles qui lui sont présentés. Il fera de la transposition s'il applique ce principe ultérieurement face à de nouveaux cercles avec des tailles différentes de ceux du premier apprentissage, c'est-à-dire qu'il sélectionnera à nouveau le plus grand des cercles présentés afin d'obtenir sa récompense. L'animal-apprenant a dégagé un principe d'une situation

d'apprentissage, qu'il peut ensuite appliquer à des situations très similaires. À nouveau, cela correspond aux définitions du transfert d'apprentissage.

Un point commun ressort de tous ces courants de recherche : les éléments qui constituent la situation d'apprentissage initiale sont très semblables à ceux de la situation de transfert. Cette idée qu'il faut une identité des éléments entre les deux tâches est toujours présente dans des approches contemporaines du transfert (p. ex., Bracke, 1998). Cependant, dans un souci de compréhension des conditions de manifestation du transfert et du phénomène de transfert lui-même, elle a été précisée ou remise en question. Le problème dans la similarité est qu'il faut identifier ce qui doit être identique précisément. L'identité pourrait notamment porter sur les compétences à transférer plus que sur les éléments du contenu (Taktek, 2017). Ces incertitudes quant à la cible de la similarité entraînent des problèmes d'évaluation du transfert (Frenay, 2004 ; Singley et Anderson, 1989).

Le courant cognitiviste a élaboré une vision légèrement différente du transfert dans laquelle les processus cognitifs nécessaires à une tâche ont une place centrale (Cyr, 2012). Cela se justifie par le fait que dans le cognitivisme toute tâche passerait par la construction de représentations mentales symboliques (Lobato, 2006). Ainsi, dans le cognitivisme, le transfert repose essentiellement sur les structures internes de pensée de l'apprenant, à la différence du behaviorisme où ce sont les stimuli externes qui déterminent si le transfert peut avoir lieu ou non (Cyr, 2012 ; Haskell, 2001). Dans le cognitivisme, si les représentations mentales peuvent se superposer, s'il y a analogie (Day et Goldstone, 2012), alors le transfert devrait avoir lieu (Sternberg et Frensch, 1993). En conséquence, il faut que l'individu ait suffisamment d'expertise pour adopter les processus cognitifs appropriés, développer les représentations mentales adaptées à la résolution des deux situations d'apprentissage (Bracke, 1998 ; Cyr, 2012). Cette conception du transfert amène un nouveau niveau de similarité qui repose sur les éléments structurels de la tâche. Cela permet de s'affranchir des similarités de surface,

et assure en plus un transfert plus efficace (Bracke, 1998), mais seulement si l'analogie est découverte.

Ainsi, le transfert est défini de façon assez consensuelle à travers les courants de recherche. Il « survient chaque fois que des connaissances et habiletés acquises antérieurement affectent la façon dont de nouvelles connaissances et habiletés sont apprises et manifestées » [traduction libre] (Cormier et Hagman, 1987, p. 1). En revanche, la similarité n'est pas entendue de la même façon selon les approches théoriques. Pour certains auteurs, il s'agit exclusivement d'une similarité de surface, donc liée au contenu des tâches présentées, qui peut donc être manipulée par les personnes construisant les tâches (Bracke, 1998). Pour d'autres, la similarité se situe à un niveau plus abstrait. Il peut s'agir des compétences nécessaires dans la nouvelle situation (Taktek, 2017), ou de similarité structurelle supposant de détecter l'analogie entre les deux situations d'apprentissage (Day et Goldstone, 2012). Il semblerait que ces différents aspects du transfert d'apprentissage aient un lien avec la probabilité de son observation.

2.2.2 Rareté d'observation empirique du transfert d'apprentissage

Considérant la définition du transfert d'apprentissage, il est attendu qu'il soit un but important dans tout enseignement (Barnett et Ceci, 2002 ; Day et Goldstone, 2012 ; Perkins et Salomon, 1992). Il offre la perspective de voir un apprentissage réutilisé ultérieurement, notamment dans des contextes qui peuvent différer de celui où l'apprentissage a eu lieu (Day et Goldstone, 2012 ; Haskell, 2001). Ainsi, toute personne dont le rôle est de transmettre des connaissances ou compétences espère qu'il y aura du transfert d'apprentissage (Bransford et Schwartz, 1999). Cependant, ce transfert existe-t-il ? Étant donné l'enjeu considérable que représente le transfert d'apprentissage, pour le système scolaire notamment (Barnett et Ceci, 2002 ; Day et Goldstone, 2012 ; Perkins et Salomon, 1992), de nombreuses équipes de recherche ont

exploré cette question (Barnett et Ceci, 2002 ; Day et Goldstone, 2012). Il ressort jusqu'à maintenant une littérature hétérogène, faisant douter de l'existence même du transfert pour certains auteurs (Detterman, 1993). Il convient donc de faire un état des connaissances sur les preuves empiriques du transfert d'apprentissage.

Il y aurait une difficulté réelle à observer du transfert d'apprentissage (Barnett et Ceci, 2002 ; Day et Goldstone, 2012 ; Detterman, 1993 ; Lobato, 2006). Concrètement, depuis Thorndike et Woodworth en 1901, les échecs sont récurrents dans les études d'entraînement. Autrement dit, le plus fréquent est que les auteurs concluent à l'absence de transfert entre les deux tâches ou situations d'apprentissage, donc que l'apprenant n'a pas été en mesure d'appliquer le premier apprentissage dans la seconde tâche (p. ex., Anolli *et al.*, 2001 ; Gick et Holyoak, 1983 ; Sala et Gobet, 2017). Cependant, les résultats démontrant du transfert existent (p. ex., Blakey et Carroll, 2015). En conséquence, plusieurs auteurs ont tout de même cherché à dégager des conditions facilitatrices du transfert, notamment pour comprendre pourquoi il était si rare d'en observer. Ce qui est le plus rapporté, et ce depuis Thorndike et Woodworth (1901), est le degré de similarité entre les deux situations d'apprentissage. La littérature tend à montrer que plus il y a de similarité de surface, plus il peut y avoir de transfert d'apprentissage (Franks *et al.*, 2000 ; Lightbown, 2008 ; Gentner *et al.*, 1993 ; Singley et Anderson, 1989). À l'inverse, plus les situations sont dissemblables, moins il y a de transfert observé (Brown, 1990 ; Singley et Anderson, 1989). La similarité en jeu ici est celle liée au contenu, la similarité de surface (Day et Goldstone, 2012). Lorsque la similarité est structurelle, c'est-à-dire qu'elle repose sur les raisonnements à utiliser dans les tâches, le transfert est aussi rare que dans toute situation où il n'y a pas de similarité de surface (Gick et Holyoak, 1983).

Day et Goldstone (2012) avancent que la similarité de surface agit comme un indice, un élément évocateur de l'apprentissage initial, facilitant le lien avec la nouvelle situation, alors que la similarité de structure n'offre pas cette possibilité. La similarité

de surface est encore plus utile si les éléments identiques sont utilisés dans les mêmes rôles (Ross, 1989). Avoir seulement des éléments identiques qui n'ont pas la même fonction dans les deux situations d'apprentissages nuit aussi au transfert (Ross, 1989). Ce besoin d'un indice évocateur est renforcé par le constat que dans les études où la similarité est structurelle, si l'attention des participants est explicitement orientée vers leur apprentissage antérieur, alors ils parviennent à voir l'analogie, ils parviennent à transférer leurs connaissances (Gick et Holyoak, 1983). L'élément évocateur qui fait défaut dans les tâches où il y a seulement une similarité structurelle est donné, et viendrait donc remplacer la similarité de surface dans le rôle d'indice.

Cependant, les auteurs relèvent que la similarité de structure, une fois découverte, est plus utile pour résoudre la nouvelle situation que la similarité de surface (Gentner *et al.*, 1993). Devoir recourir au même processus cognitif pour résoudre les deux tâches augmente les occurrences du transfert (Adams *et al.*, 1988 ; Lockhart *et al.*, 1988), si l'analogie est remarquée. Autrement dit, les similarités de surface favorisent le transfert entre deux situations d'apprentissage, mais avec une compréhension moins profonde que lorsqu'une analogie est détectée et un raisonnement transféré.

Considérant la similarité de surface comme un obstacle à la détection des similarités structurelles, et donc au transfert de raisonnement, des chercheurs tentent de les réduire dans les protocoles de recherche. Le transfert en est effectivement amélioré (p. ex., Brown *et al.*, 1986 ; Son *et al.*, 2010). Certains tentent même de supprimer tout contenu superficiel non indispensable afin de favoriser l'orientation de l'attention vers le contenu structurel (Day et Goldstone, 2012). Cette idée s'appuie sur des recherches montrant que les éléments superficiels intéressants, mais inutiles à la compréhension et donc au transfert, venaient nuire au transfert (Mayer *et al.*, 2008). L'attention a tendance à se focaliser sur les éléments superficiels, faisant ignorer les éléments structurels fondamentaux à la compréhension de la situation (Day et Goldstone, 2012). Les éléments superficiels créent de « l'interférence avec les processus cognitifs

profonds nécessaires à la construction de structures de connaissances généralisables » [traduction libre] (Day et Goldstone, 2012, p. 156). Cependant, demeure le problème des éléments de surface qui sont nécessaires dans le premier apprentissage. Ils génèrent assurément le même problème d'interférence tout en ne pouvant pas être éliminés (Day et Goldstone, 2012). Des chercheurs ont élaboré un protocole où, pour un groupe, la tâche était décontextualisée au maximum. Concrètement, l'énoncé présenté contenait seulement des termes généraux afin de limiter les interférences. Pour l'autre groupe, les mêmes idées de l'énoncé étaient véhiculées avec des termes plus connotés. Ils ont observé un meilleur transfert quand le contenu était décontextualisé (Clement *et al.*, 1994). Cependant, cela crée un autre problème. En décontextualisant, ne reste que du matériel abstrait, et cela affecte négativement la compréhension, donc le premier apprentissage (Carragher *et al.*, 1987). En conséquence, il ne peut vraiment y avoir transfert (Day et Goldstone, 2012).

Les recherches en entraînement cognitif ont dans un premier temps laissé penser qu'elles produisaient du transfert (p. ex., Thorell *et al.*, 2009). Étant de l'apprentissage à un niveau abstrait, ce constat semble en accord avec les arguments suggérant que les similarités de structures permettent plus de transfert s'il n'y a pas d'interférences (Day et Goldstone, 2012). Cependant, après de nombreuses études, le portrait global des résultats est plus imprécis. Il y a beaucoup de contradictions d'une étude à l'autre (Melby-Lervåg et Hulme, 2013). Certaines concluent à la présence de transfert (p. ex., Au *et al.*, 2015), d'autres non (p. ex., Redick *et al.*, 2013). La plupart des méta-analyses qui ont suivi ont conclu que le transfert n'était pas plus probant en entraînement cognitif que dans d'autres domaines (Melby-Lervåg et Hulme, 2013). Les tailles d'effet dégagées sont souvent minimales, menant à la conclusion fréquente qu'il y a peu ou pas de transfert (Sala et Gobet, 2017).

La plupart des études dans ce domaine ont concerné l'entraînement de la mémoire de travail (p. ex., Chein et Morrison, 2010). Beaucoup moins ont porté sur l'entraînement

du contrôle inhibiteur ou de la flexibilité cognitive. Logiquement, les méta-analyses réalisées jusqu'à présent portent sur l'entraînement de la mémoire de travail. Une méta-analyse récente, et dégageant des effets peu probants quant au transfert, porte sur toutes les FE (Kassai *et al.*, 2019), en se limitant cependant à une population d'enfants de 12 ans maximum, dont des enfants ayant des troubles développementaux. En conséquence, la portée de ses résultats est limitée.

Il ressort de cet exposé que le transfert est rare. Les recherches ont permis de déterminer que la similarité de surface entre deux tâches était la meilleure garantie de transfert d'apprentissage (p. ex., Franks *et al.*, 2000 ; Lightbown, 2008). Cependant, le transfert obtenu par analogie entre les tâches, donc sans similarités de surface, serait plus profond (p. ex., Gentner *et al.*, 1993). C'est pourquoi les chercheurs veulent privilégier les similarités structurelles par rapport aux similarités de surface. Cette dichotomie n'est toutefois pas suffisante pour décrire le phénomène de transfert. La similarité est une notion subjective que chaque protocole de recherche doit préciser. Il est donc nécessaire d'avoir des définitions opérationnelles du transfert pour compléter cette recension.

2.2.3 Opérationnalisations variées du transfert d'apprentissage

La littérature sur le transfert d'apprentissage est certes foisonnante, cela ne l'empêche pas d'être lacunaire sur le plan méthodologique, comme le soulèvent Barnett et Ceci (2002). Le concept de transfert, bien que défini, est souvent abstrait et vague. Il est donc difficile de l'évaluer sur la base de sa seule définition. Thorndike et Woodworth (1901) l'avaient déjà compris en incluant dans leur définition l'idée d'éléments identiques d'une situation à l'autre. Cependant, comme exposé précédemment, même cette notion de similarité est ambiguë, car elle peut concerner différents aspects des tâches. Cela signifie qu'une définition opérationnelle est nécessaire pour faire une évaluation rigoureuse du transfert d'apprentissage (Barnett et Ceci, 2002). Or, il en

existe plusieurs. Autrement dit, tous les chercheurs ne vont pas évaluer de la même façon différents degrés de transfert. C'est un problème important lorsqu'il s'agit d'interpréter leurs recherches. Il devient difficile de comparer des résultats si l'opérationnalisation est variable (Barnett et Ceci, 2002), ce qui inclut le cas des méta-analyses. Il y a donc peut-être ici une piste d'explication aux résultats contradictoires dans le domaine du transfert d'apprentissage. Cependant, avant de s'intéresser aux conséquences de cette variabilité d'opérationnalisation, il faut commencer par les exposer.

La première opérationnalisation, et la plus simple, est en deux catégories : le transfert positif et le transfert négatif (Cormier et Hagman, 1987 ; Perkins et Salomon, 1992). Le transfert est dit positif lorsqu'un premier apprentissage a un impact positif sur un second apprentissage. Autrement dit, l'apprentissage initial facilite l'apprentissage dans le nouveau contexte. Il s'agit de transfert négatif lorsque l'influence est négative, c'est-à-dire quand le premier apprentissage vient nuire aux apprentissages subséquents. Cela survient quand le premier apprentissage cause une interférence avec le second (Bartolotti, 2015). Ainsi, le type de transfert souhaité en recherche et en éducation est un transfert positif : voir la résolution, la performance, l'acquisition, dans un nouveau contexte, facilitée, améliorée, par l'apprentissage initial. En conséquence, le terme de transfert semble employé abusivement à la place de transfert positif.

Un deuxième niveau d'opérationnalisation existe, certainement le plus fondamental pour la littérature sur le sujet. Il concerne le degré d'éloignement entre la première et la seconde tâche. Deux catégories ont été consacrées : le transfert proche et le transfert éloigné (Perkins et Salomon, 1992). Comme leur nom le suggère, le transfert proche a lieu lorsque les deux tâches sont semblables, alors que le transfert éloigné survient lorsque les deux tâches ne partagent aucun point commun en apparence (Perkins et Salomon, 1992). Il semble cependant difficile de réduire tous les transferts possibles à ces deux extrêmes (Haskell, 2001). De plus, il n'existe aucune codification commune

de ce qui doit être considéré comme proche ou comme éloigné (Perkins et Salomon, 1992). En conséquence, la catégorisation du transfert souhaité et observé peut varier à travers les études, ce qui est, selon Barnett et Ceci (2002), à l'origine des divergences de résultats.

En réponse à cette problématique, plusieurs auteurs ont entrepris de développer des typologies plus élaborées du transfert. Butterfield et Nelson (1991) ont ainsi développé quatre catégories de transfert, en lieu et place des deux catégories habituelles, qui ne se basent pas uniquement sur un gradient d'éloignement entre la tâche initiale et la tâche de transfert. Il y a le transfert dans la tâche, c'est-à-dire la mise en application des instructions lues ou entendues qui servent à réaliser la tâche. Vient ensuite le transfert à travers les tâches, qui correspond au fait d'utiliser un principe appris dans une tâche antérieure dans une nouvelle tâche sans avoir reçu d'instruction pour cette nouvelle tâche. Donc il y a transposition du principe. La troisième catégorie est le transfert discriminatif, qui consiste à parvenir à appliquer le bon principe à la tâche présentée, alors qu'au moins deux principes ont été appris préalablement. Enfin, le transfert inventif, dans lequel il s'agit d'utiliser un principe non appris et donc non enseigné, nécessaire pour réussir la tâche, en pratiquant de la transposition de logique pour dégager un nouveau principe. Cette opérationnalisation offre une vision plus précise de ce que recouvre le concept de transfert dans les faits.

Une autre typologie impliquant six catégories a été développée par Haskell (2001), basée sur le degré d'éloignement entre les tâches ou situations d'apprentissage. Les trois premières se situent avant même le transfert proche, signifiant que le degré de similarité est très élevé, mais justifiant tout de même une distinction quant au niveau de transfert. La première est appelée « transfert non spécifique ». Elle renvoie à l'idée que tout apprentissage s'appuie forcément sur des connaissances ou compétences antérieures, et donc transférées pour réaliser le nouvel apprentissage. Il est en effet peu probable d'apprendre à courir sans avoir appris à se mettre debout. C'est le seul niveau

de transfert, selon l'auteur, pour lequel il n'y a pas de réelle difficulté à transférer les connaissances ou compétences. La deuxième catégorie est intitulée «transfert d'application», et renvoie au fait d'appliquer une chose apprise à son contexte précis d'application. Par exemple, apprendre le fonctionnement d'un microscope et parvenir à l'utiliser. La troisième catégorie est le transfert de contexte. Concrètement, la tâche est identique lors des deux occurrences, en revanche le contexte est légèrement différent. Vient ensuite la quatrième catégorie, le transfert proche, où le «transfert de connaissances acquises antérieurement se fait dans une situation proche, mais légèrement différente». Il faut comprendre ici que les deux tâches ne sont plus identiques, à la différence du transfert de contexte. L'auteur donne comme exemple expérimenter le patin à glace lorsque le patin à roues alignées est déjà maîtrisé. Il est attendu que le premier apprentissage facilite le second. Vient après, en cinquième catégorie, le transfert éloigné qui consiste à appliquer des apprentissages antérieurs à des situations différentes de celles où ils ont été réalisés. Cela renvoie notamment à la capacité à détecter les analogies entre deux tâches. Finalement, on retrouve le transfert créatif, encore nommé déplacement. Selon l'auteur, il survient lorsque les analogies entre deux concepts ou apprentissages mènent à la création de quelque chose de complètement nouveau. Il y a, dans cette typologie, un réel effort pour distinguer les différents degrés de transfert en fonction de la similarité ou de l'éloignement entre les apprentissages.

La figure 2.2 permet de synthétiser et de mettre en perspective toutes les typologies présentées jusque-là, afin de mieux saisir pourquoi il semble utile et important de définir des degrés précis de transfert d'apprentissage. Plus l'opérationnalisation est précise et détaillée, plus les observations de transfert devraient être fines et nuancées.

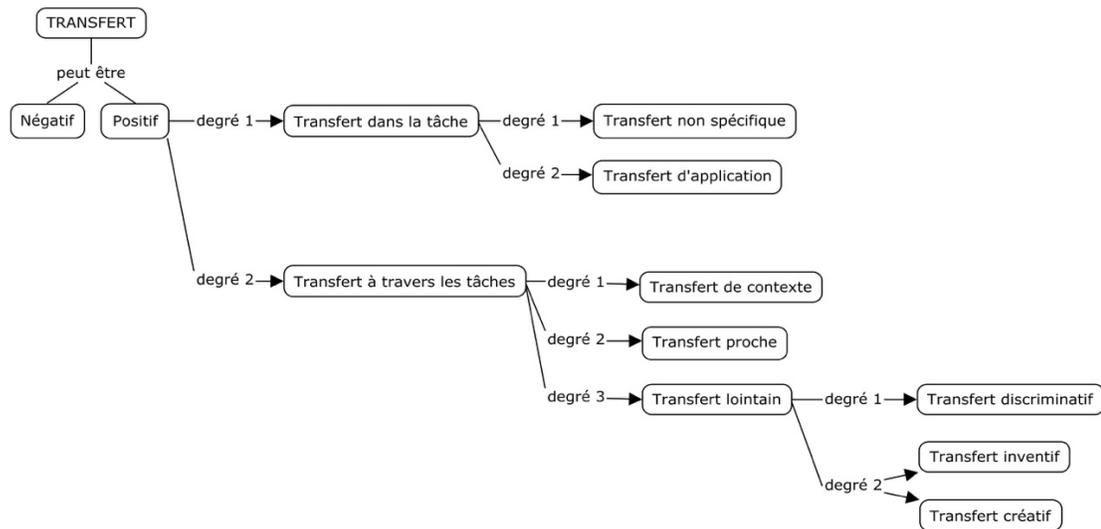


Figure 2.2. Réseau conceptuel des différents degrés de transfert d'apprentissage d'après les typologies de Butterfield et Nelson (1991), Perkins et Salomon (1992) et Haskell (2001).

Il reste, comme le fait remarquer Haskell (2001), que l'interprétation de ce qui est similaire ou non demeure indéfinie. Même sa typologie à six niveaux ne permet pas de déterminer de façon opérationnelle ce qui est proche et ce qui est éloigné (Haskell, 2001). Par ailleurs, le transfert non spécifique et le transfert de contexte peuvent être, selon les situations, qualifiés de proche ou d'éloigné. Par exemple, un transfert de contexte peut avoir lieu en refaisant exactement la même tâche ou une tâche semblable dans un nouveau contexte, ce qui serait alors qualifié de transfert proche. Alors qu'il est aussi possible d'envisager la passation d'une tâche différente de la première dans un contexte lui aussi différent, ce qui serait alors identifié comme du transfert éloigné. Il est aussi possible de relever que plusieurs types de transfert peuvent coexister dans une même situation. Citons le transfert de contexte qui peut être couplé à tous les autres types de transfert. Quelle que soit la tâche, dès lors que le lieu de réalisation, le moment,

les personnes présentes, le support sont modifiés, le contexte en est modifié. Ainsi, il est possible, par exemple, de créer des conditions de transfert d'application jumelées à celles d'un transfert de contexte. Le transfert discriminatif peut aussi être concerné par le cumul de types de transfert : que ce soit pour des tâches semblables ou clairement différentes, dans un contexte inchangé ou nouveau, il est souvent possible que plusieurs connaissances concurrentes permettent de réaliser la tâche, menant à sélectionner la plus pertinente, donc à réaliser un transfert discriminatif.

Il ressort des propos qui précèdent que certains types de transfert ne permettent pas d'affiner la catégorisation selon le degré d'éloignement entre les tâches et que certains types de transfert peuvent être similaires ou bien se recouper. Ces éléments semblent nuire à une catégorisation claire du transfert d'apprentissage, et, en conséquence, cela rend difficile la comparaison des transferts observés dans les études expérimentales. De plus, il apparaît clairement que la question du contexte, absente du débat transfert proche-transfert éloigné, soulève un élément intéressant malgré tout, soit l'impact potentiel du changement de contexte sur la probabilité d'observer du transfert.

2.2.4 Typologie du transfert d'apprentissage

Considérant les limites énoncées concernant la classification terminologique du transfert d'apprentissage, des auteurs ont cherché à élaborer d'autres conceptualisations du transfert d'apprentissage. Barnett et Ceci (2002) ont élaboré une typologie détaillée du transfert éloigné qui se base sur les aspects méthodologiques des tâches, et non le degré d'éloignement global entre les deux tâches, afin de favoriser l'interprétation du transfert dans les recherches scientifiques. Le choix de se concentrer sur le transfert éloigné se justifie par le fait qu'il est le plus sujet à controverse. L'opérationnalisation du transfert proche pourrait aussi faire l'objet de désaccord, par exemple en devant définir ce que sont des tâches similaires comme le montre la typologie de Haskell (2001). Cependant, Barnett et Ceci évacuent ce problème en

considérant que le minimum de transfert possible est du transfert proche. En conséquence, les problèmes de qualification du transfert sont reportés sur celui qualifié d'éloigné, qui recouvre donc tous les cas où l'on retrouve une forme de dissemblance entre les tâches ou situations d'apprentissage.

Ainsi, Barnett et Ceci (2002) ont découpé en neuf facteurs les éléments pouvant caractériser une situation d'apprentissage (comme présenté dans le Tableau 2.1). Pour chacun de ces facteurs, différents degrés d'éloignement entre la première et la seconde tâche sont possibles. Ainsi, l'éloignement est évalué pour chaque facteur. Il devient alors possible de dresser un portrait global du degré d'éloignement entre les deux situations. Selon ces auteurs, c'est à partir de cette typologie qu'il faudrait interpréter les résultats d'études d'entraînement, et non à partir d'une classification globale de ce qui est proche ou éloigné. En somme, pour comparer les études, il faudrait décomposer leurs caractéristiques méthodologiques selon les neuf facteurs proposés, et, pour chaque facteur, se prononcer sur le degré d'éloignement entre les deux tâches. Les facteurs en question se répartissent en deux catégories principales : le contenu transféré et le cadre contextuel du transfert (provenance, destination et moment du transfert ; Barnett et Ceci, 2002).

Tableau 2.1

Typologie du transfert éloigné de Barnett et Ceci (2002)

	Compétence apprise
Contenu transféré	Changement dans la performance évaluée
	Demandes en mémoire liées à la tâche de transfert
Cadre contextuel du transfert	Domaine de connaissance
	Contexte physique de réalisation
	Contexte temporel
	Contexte fonctionnel
	Contexte social d'acquisition
	Modalité d'acquisition

Pour le contenu, les auteurs considèrent la compétence apprise, pour identifier si elle est plutôt générale ou spécifique. Par exemple, apprendre à poser une addition est une compétence spécifique, et élaborer un raisonnement est une compétence générale. Ils incluent aussi le changement dans la performance évaluée, autrement dit si la vitesse d'exécution, l'exactitude ou l'approche ont changé. Enfin, ils ajoutent les demandes en mémoire liées la tâche de transfert. Concrètement, il s'agit d'identifier à quel point la forme entre les deux tâches est semblable. Si la première était une seule multiplication déjà posée à résoudre, dans le cas où la seconde tâche est une simple répétition de la première avec des nombres différents, alors il s'agit d'exécution. Si la seconde tâche mentionne qu'il faut faire des multiplications mais qu'elles ne sont pas encore posées, alors il s'agit de reconnaissance. Enfin, si la seconde tâche est une résolution de problème où aucune mention de multiplication n'est faite mais qui nécessite d'utiliser

des multiplications, alors il s'agit de rappel selon leur terminologie (voir le Tableau 2.2).

Tableau 2.2

Typologie du transfert lointain de Barnett et Ceci (2002): le contenu transféré

	Transfert proche		Transfert éloigné
Contenu: qu'est-ce qui est transféré?			
Compétence apprise	Procédure	Représentation	Principe, heuristique
Changements dans la performance	Vitesse	Exactitude	Approche
Demandes en mémoire	Exécuter	Reconnaître et exécuter	Rappeler, reconnaître et exécuter

Pour le cadre contextuel, les auteurs proposent de se prononcer sur le degré d'éloignement entre les deux situations ou tâches du domaine de connaissances, le contexte physique de réalisation, le contexte temporel (le délai entre les deux tâches), le contexte fonctionnel (fonction pour laquelle l'habileté est utilisée), le contexte social d'acquisition (en groupe ou seul), et la modalité d'acquisition (voir les exemples donnés dans le Tableau 2.3). Cette typologie permet donc de détecter une importante variété de changements entre deux situations d'apprentissage. Dans la mesure où le moindre changement peut mener à des résultats différents quant au transfert (Spencer et Weisberg, 1986), identifier avec précision le degré d'éloignement entre deux tâches en isolant différents facteurs, même si ce sont des éléments de surface, pourrait effectivement permettre de mieux interpréter les observations empiriques et mieux

comprendre la survenue ou non du transfert, et ainsi le favoriser (Day et Goldstone, 2012).

Tableau 2.3

Typologie du transfert éloigné de Barnett et Ceci (2002) : le contexte du transfert, illustrations

Contexte: où et quand est-ce transféré?					
	Transfert proche		←————→		Transfert éloigné
Domaines de connaissance	Identiques	Fractions et nombres décimaux	Physique et mathématiques	Science et histoire	Science et arts
Contextes physiques	Identiques	École, 2 salles différentes	École et laboratoire	École et maison	École et à la plage
Contextes temporels	Même session	Lendemain	Une semaine plus tard	Un mois plus tard	Un an plus tard
Contextes fonctionnels	Identiques	Académiques: exercice et évaluation	Académique et tâches administratives	Académique et questionnaire informel	Académique et jeu
Contextes sociaux	Identiques	Individuel et en paire	Individuel et en petit groupe	Individuel et en grand groupe	Individuel et en société
Modalités	Identiques	Choix de réponses et réponses à développement	Lecture scolaire et examen oral	Lecture et activité récréative mentale	Lecture et activité manuelle

L'opérationnalisation de Barnett et Ceci (2002) propose une solution à la difficulté à qualifier le transfert dans les études expérimentales. En découpant les tâches en neuf facteurs, et en identifiant le degré de transfert pour chacun de ces facteurs, il devient plus aisé d'observer les transferts mis en place, et ainsi obtenir un tableau plus juste du

transfert observé. De plus, cela permet de prendre en considération l'aspect contextuel, souvent négligé dans les autres modalités d'opérationnalisation. Cependant, la qualification du degré de transfert pour les facteurs contextuels est aussi sujette à interprétation et mènerait à un travail colossal s'il fallait le réaliser pour de nombreuses études expérimentales. Il semble donc nécessaire, dans l'opérationnalisation, de définir une méthode qui pallie cette difficulté. La section suivante vise à définir l'opérationnalisation retenue dans ce travail de recherche.

2.2.5 Opérationnalisation du transfert d'apprentissage retenue et justification

Dans le cadre du travail envisagé dans ce mémoire, il est prévu d'analyser les effets des entraînements cognitifs de façon plus fine que ce qui a été fait afin de formuler des conclusions plus précises à leur endroit. Concrètement, il s'agit de parvenir à identifier quels sont les facteurs favorisant le transfert d'apprentissage. Pour ce faire, il est alors indispensable de recourir à une opérationnalisation détaillée du transfert, afin d'augmenter la probabilité de dégager ces facteurs.

L'opérationnalisation retenue ne s'intéresse qu'au transfert positif et se base entièrement sur le travail de Barnett et Ceci (2002), puisque le découpage en facteurs permet d'obtenir un aperçu plus précis des transferts d'apprentissage demandés et obtenus. Il ressort cependant une difficulté à qualifier le transfert pour chacun des facteurs contextuels, tel que mentionné plus haut. Concrètement, il pourrait être difficile de déterminer le degré d'éloignement exact entre deux tâches pour chacun de ces facteurs, comme c'est le cas pour la qualification du transfert réalisée de façon globale. Déterminer le degré d'éloignement global ou au niveau de chaque facteur, afin d'être constant et donc fidèle dans la classification, demande d'avoir des référents, c'est-à-dire que la plupart des éléments caractéristiques de chaque catégorie ont déjà été catégorisés. Or, l'importante variété de situations expérimentales cherchant à produire du transfert rend improbable de pouvoir développer de tels référents stables.

Afin de contourner ce problème, Barnett et Ceci (2002) avaient déjà élaboré une solution. Ils ont opté pour une qualification binaire du transfert au niveau de chaque facteur contextuel (comme le montre la Figure 2.3). Autrement dit, pour le domaine de connaissance, le contexte physique, le contexte temporel, le contexte social, le contexte fonctionnel et la modalité, on indique si le transfert est proche ou éloigné. Cette dichotomie est jugée réductrice par les auteurs eux-mêmes. Cependant, à la différence de la dichotomie habituelle transfert proche-transfert éloigné appliquée à la tâche entière, dans cette typologie la dichotomie est appliquée à chacun des neuf facteurs du transfert identifiés, trois pour le contenu transféré et six pour le contexte du transfert. Ainsi, même en se limitant à qualifier de proche ou éloigné le contexte physique ou le contexte social du transfert d'apprentissage, par exemple, le portrait global du transfert qui en résulte serait déjà particulièrement détaillé. Par ailleurs, recourir à la binarité à ce niveau du traitement de l'information assure une constance dans l'interprétation des méthodologies expérimentales : si c'est identique ou quasi identique, ce sera qualifié de proche, dans tous les autres cas, d'éloigné. Ce faisant, cette typologie est plus susceptible de faciliter l'observation, et donc l'identification, des facteurs où le transfert s'observe le plus. En détaillant par facteur le caractère proche ou éloigné, autant pour le contenu que le contexte, ressortiront les facteurs où un transfert éloigné aura été observé, donc les facteurs pour lesquels du transfert jugé intéressant serait possible. Enfin, en déterminant le caractère proche ou éloigné par facteur, cela permettra d'obtenir une classification des méthodologies des études expérimentales analysées à travers cette opérationnalisation. En conséquence, dans le cadre des analyses réalisées dans le présent travail, pourront être utilisées pour chaque calcul des études vraiment semblables d'un point de vue méthodologique. Autrement dit, cette opérationnalisation permet de comparer ce qui est comparable. Cette opérationnalisation n'ayant vraisemblablement pas encore été utilisée dans les méta-analyses s'intéressant à l'entraînement cognitif, elle devrait permettre de dégager des interprétations plus fines que ce qui a été obtenu jusqu'à maintenant dans le cadre du transfert d'apprentissage suite à un entraînement cognitif.

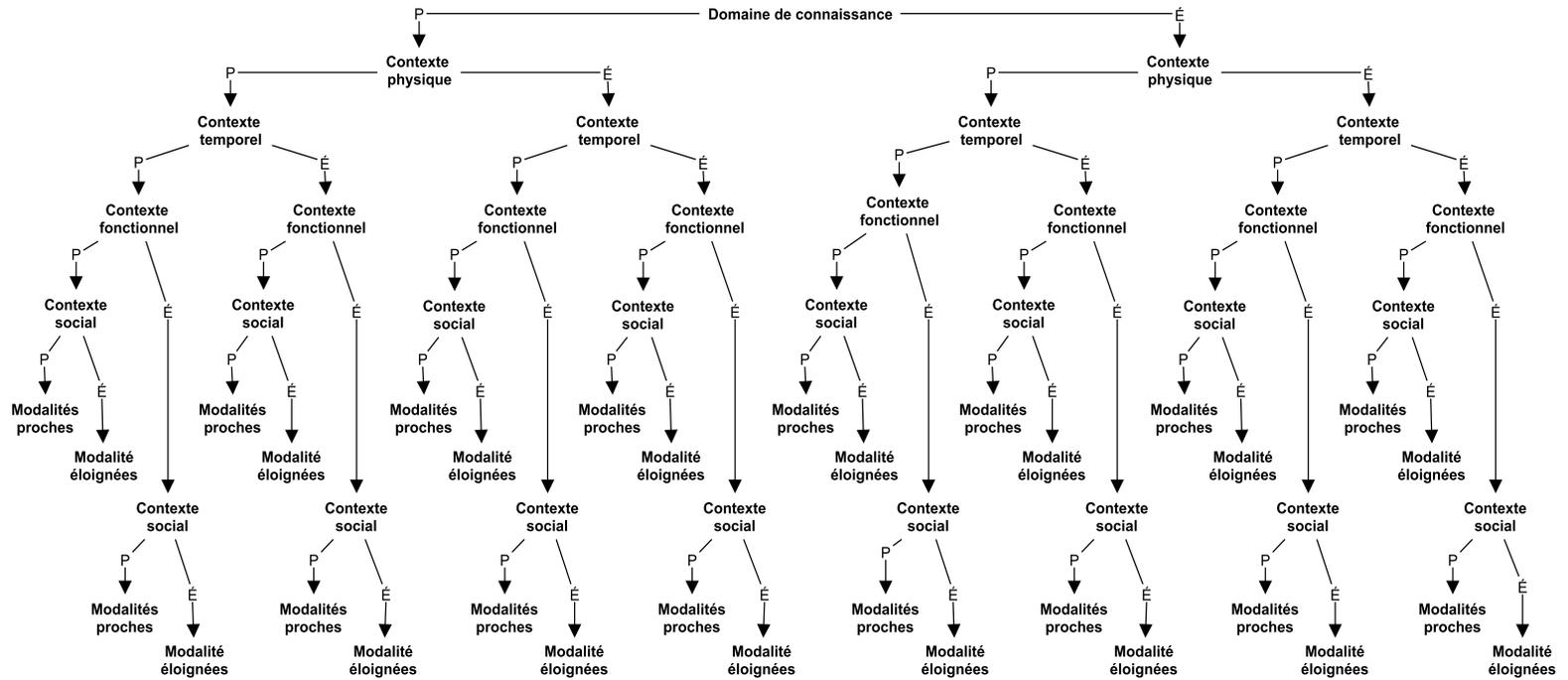


Figure 2.3. Diagramme de l'opérationnalisation des facteurs contextuels du transfert de Barnett et Ceci (2002). Adapté de « When and where do we apply what we learn? A taxonomy for far transfer », par Barnett, S. M. et Ceci, S. J., 2002, *Psychological Bulletin*, 128(4), p. 628.

Note : P = proche ; É = éloigné

À l'aune des éléments dégagés sur le transfert d'apprentissage, il semble qu'il soit difficile de l'observer (p. ex., Barnett et Ceci, 2002 ; Day et Goldstone, 2012 ; Melby-Lervåg et Hulme, 2013 ; Sala et Gobet, 2017). Cependant, il semble que ce soit possible, notamment lorsque certaines conditions favorables sont réunies (Day et Goldstone, 2012 ; Ross, 1989). Ces conditions paraissent toutefois insuffisantes si l'on souhaite observer du transfert lorsqu'il n'y a pas d'éléments de surface identiques. Il ressort de cet exposé l'importance de déterminer quand et comment du transfert peut être observé ainsi que le type de transfert possible. Cela mène au problème de la caractérisation du transfert. L'évaluation globale du degré de similarité entre des tâches est potentiellement une source de discordance de résultats entre les études d'entraînement cognitif. C'est pourquoi une opérationnalisation détaillée du transfert d'apprentissage, telle que proposée par Barnett et Ceci (2002), paraît indispensable afin de parvenir à analyser les résultats des études expérimentales sur le transfert.

2.3 Hypothèses de recherche

Les buts de cette recherche sont de déterminer 1- *le niveau d'efficacité des entraînements cognitifs visant le développement des FE de bas niveau, en s'attachant à définir le plus finement possible les niveaux de transfert atteints* et 2- *à identifier les éventuelles variables modératrices de l'efficacité des entraînements*. Ces variables modératrices sont des éléments mentionnés au fil de la présentation et pouvant être liés à l'efficacité relative des entraînements cognitifs. Il s'agit tout d'abord de l'âge des participant·e·s du fait du développement cérébral jusqu'au début de l'âge adulte (Gotgay *et al.*, 2004). Vient ensuite le type d'entraînement. Les importantes différences dans les exigences cognitives et de forme entre les types d'entraînement mènent à s'interroger sur leur impact différentiel. Certaines variables découlent de constats posés par des recherches antérieures suggérant un effet du type de groupe contrôle (Sala et Gobet, 2017) et de caractéristiques de l'entraînement, particulièrement son caractère adaptatif (Diamond, 2014), mais aussi sa fréquence et sa durée. Enfin, considérant

l'approche inhabituelle du transfert retenue, les facteurs faisant partie de la typologie de Barnett et Ceci (2002) sur le contenu transféré et le contexte du transfert sont aussi envisagés comme variable modératrices de l'efficacité des entraînements. Toutes sont incluses dans les hypothèses ou questionnements exploratoires présentés plus loin.

Ces buts sont motivés par la place centrale des FE dans les apprentissages. Tous les comportements sont contrôlés par les FE, et tous les apprentissages passent par les FE. En conséquence, il semble plus que pertinent de s'intéresser à favoriser leur développement. C'est d'ailleurs l'objectif des entraînements cognitifs. Comme exposé, différents modèles d'organisation des FE coexistent, ce qui pourrait avoir une influence sur l'interprétation des résultats de ces entraînements. Cependant, la conceptualisation même des entraînements reposant sur le modèle traditionnel à trois facteurs des FE (Diamond, 2013), nous amène à le retenir pour la méta-analyse. En revanche, concernant le transfert d'apprentissage, l'interprétation des résultats se fera à l'aune d'une opérationnalisation atypique pour ce domaine de recherche. S'intéresser aux effets d'un entraînement consiste à observer la présence du transfert d'apprentissage. Or, pour cette notion l'opérationnalisation est généralement limitée, laissant un certain flou sur ce qui est similaire ou ne l'est pas. C'est pourquoi l'opérationnalisation en facteurs de Barnett et Ceci (2002) a été retenue pour analyser méthodiquement les études intégrées dans la méta-analyse.

Tout d'abord, un élément spécifique de cette recherche est de tenter de dégager des niveaux de transfert plus variés que ceux habituellement utilisés dans les études d'entraînement cognitif, en s'appuyant sur la typologie de Barnett et Ceci (2002).

Ensuite, afin de chercher à atteindre les buts énoncés, plusieurs hypothèses ont été posées. D'après les recherches antérieures, il est possible de dire que :

- 1- Considérant le développement des FE avec l'âge (Diamond, 2013), une différence dans l'effet des entraînements selon l'âge des participant·e·s devrait être observée. Autrement dit, les performances des enfants, en fonction de leur âge, devraient, en moyenne, donner des tailles d'effet différentes.
- 2- Considérant que, d'une manière générale, les études montrent que le transfert dit proche est réalisable alors que le transfert dit éloigné ne l'est pas (p. ex., Sala et Gobet, 2017), il est attendu que plus le transfert demandé est grand, moins il sera observé. Autrement dit, une plus grande variation dans les facteurs du transfert entre l'entraînement et l'évaluation mènera à des tailles d'effet moins grandes, c'est-à-dire moins de différence dans les performances lors des évaluations entre les groupes expérimentaux et les groupes contrôle.
- 3- Considérant les résultats d'études antérieures (Diamond, 2014), il est attendu que les entraînements de type adaptatif, à cause de l'effort constant mais non décourageant qu'ils demandent aux participant·e·s, produisent plus d'effets significatifs.
- 4- Considérant les résultats des méta-analyses antérieures (Sala et Gobet, 2017), il est attendu que les études qui ont utilisé des groupes contrôle passifs aient des résultats significativement plus élevés.

Certains points ne peuvent cependant être soutenus par des hypothèses, car ils relèvent davantage de l'exploration. Voici les interrogations exploratoires retenues, qui complètent les hypothèses. En ce qui concerne le transfert :

1. Jusqu'à quel niveau de transfert les entraînements s'avèrent-ils efficaces?
2. L'âge a-t-il un rôle de modérateur sur les niveaux de transfert atteints?

En ce qui concerne les caractéristiques des entraînements :

- 1- En complément de l'hypothèse 1, pourrait-il y avoir un effet différent du type d'entraînement en fonction de l'âge?
- 2- Toujours en complément de l'hypothèse 1, l'âge pourrait-il être lié à la FE ou la compétence qui s'améliorera le plus à la suite de l'entraînement?
- 3- Le fait d'entraîner plusieurs FE en même temps pourrait-il être plus efficace?
- 4- Avoir une durée globale d'entraînement plus longue ou des séances plus fréquentes pourrait-il être plus efficace?

CHAPITRE III

MÉTHODOLOGIE

Dans ce chapitre est présentée la méthodologie de la méta-analyse réalisée. Tout d'abord, il convient de justifier le choix de la méta-analyse. Est ensuite exposée la procédure suivie pour collecter, analyser et coder les études d'entraînement cognitif nécessaires à la méta-analyse.

3.1 Choix de la méthode

Pour déterminer le niveau de transfert d'une ou plusieurs interventions, deux processus de recherche sont possibles. Le premier consiste à mener une recherche expérimentale. Concrètement, il s'agirait de comparer un entraînement avec une condition contrôle, afin de déterminer les effets de chaque intervention, et ainsi dégager le niveau de transfert obtenu pour l'entraînement. Ce type d'intervention permet de dégager une relation de cause à effet entre chacune des interventions et les résultats observés, dans la mesure où les conditions expérimentales et les variables en jeu sont rigoureusement contrôlées. Cependant, cette méthode présente fréquemment un inconvénient : la petite taille des échantillons. Travailler avec de petits échantillons de population augmente l'erreur d'échantillonnage, ce qui favorise l'inflation du résultat obtenu (Braver *et al.*, 2010), c'est-à-dire que le niveau de transfert réel aura des chances d'être inférieur à celui qui aura été identifié. Dans un domaine de recherche où les résultats négatifs sont

fréquents, mais dynamique puisque des résultats positifs sont régulièrement publiés, produire à nouveau une recherche expérimentale avec un échantillon qui serait objectivement petit par rapport à sa population d'appartenance ne semble pas pertinent. Le risque d'inflation des résultats positifs que crée cette méthodologie serait réel et n'aiderait pas à dresser un meilleur portrait des effets des entraînements cognitifs puisque le champ de recherche se compose déjà de telles études aux résultats contradictoires. Il semble plutôt nécessaire de prendre du recul sur les résultats déjà obtenus. Par ailleurs, un des buts du travail présenté est de dégager des facteurs favorisant le transfert ou des facteurs circonstanciels où plus de transfert est observé, comme l'âge des participant·e·s. Parvenir à dégager ces facteurs avec une étude expérimentale supposerait de créer autant de groupes expérimentaux que de facteurs, auxquels il faut ajouter les groupes contrôles. De plus, le nombre de participant·e·s par groupe devrait être d'autant plus grand que les effets pour chaque facteur seront petits, afin d'avoir une puissance statistique satisfaisante, et donc d'avoir une chance de détecter un effet. Autrement dit, il faudrait réaliser une étude expérimentale de très grande envergure difficilement réalisable dans le cadre du projet de maîtrise présenté ici.

Cela mène au second processus de recherche possible pour déterminer les niveaux de transfert : la méta-analyse. Cette méthodologie permet, sommairement, de procéder à une compilation des résultats déjà publiés, se basant ainsi sur de grands échantillons de populations, pour déterminer statistiquement dans quel sens semble plutôt pointer l'ensemble des recherches, pour déterminer le niveau de transfert de tels entraînements. La méta-analyse présente donc l'avantage de travailler avec de grands échantillons, permettant de se prémunir contre l'inflation dans les résultats positifs. Par ailleurs, chaque étude expérimentale constitue un résultat unique qui a besoin d'être reproduit pour acquérir une valeur scientifique solide. *A fortiori* lorsque d'autres recherches adoptant le même protocole obtiennent des résultats contradictoires, comme c'est le cas en entraînement cognitif. Dans cette situation, aucun résultat de recherche ne

prévaut. Il faut les considérer simultanément pour dégager un portrait fidèle de la littérature scientifique sur le sujet choisi. C'est ce que la méta-analyse permet. Par ailleurs, en recourant à des données secondaires — les résultats publiés dans des études expérimentales — la méta-analyse ne soulève aucun enjeu éthique ou déontologique pour sa réalisation. Cependant, à la différence d'une étude expérimentale, la méta-analyse ne permet de dégager aucune causalité. Elle peut seulement mener à la comparaison de tailles d'effet. Elle produit une synthèse de résultats qui permet de compléter les données empiriques obtenues avec des études expérimentales.

Considérant le besoin d'avoir de grands échantillons pour dégager des résultats plus fiables, ainsi que le besoin de reproduction des protocoles expérimentaux, et enfin le fait que le domaine de l'entraînement cognitif a produit beaucoup d'études expérimentales contradictoires, la méta-analyse semble la méthode la plus pertinente pour répondre à la question de recherche dans le contexte d'un mémoire de maîtrise.

3.2 Source des données

Pour réaliser une méta-analyse, il est nécessaire de disposer des résultats obtenus par toutes les études pertinentes. En l'occurrence, il faut se procurer les résultats des études d'entraînement cognitifs. Pour ce faire, un algorithme de recherche composé de mots-clés couvrant les différents aspects du sujet traité a été élaboré (voir Tableau 3.1). Le développement de l'algorithme s'inspire de ceux utilisés dans les autres méta-analyses sur l'entraînement cognitif (p. ex., Kassai *et al.*, 2019). Il couvre quatre thèmes distincts dont le choix découle du problème de recherche : les FE, l'entraînement, le transfert d'apprentissage et la méthodologie expérimentale. Les termes de recherche composant l'algorithme ont été sélectionnés pour leur représentativité du domaine de recherche concerné, les entraînements cognitifs. Concrètement, pour chacun des thèmes, une liste des mots et expressions utilisés en recherche pour couvrir chaque thème en lien avec

le problème de recherche a été dressée. Par exemple, pour le thème du transfert, les expressions et termes pertinents étaient transfer (transfert), transfer of learning (transfert d'apprentissage), near transfer (transfert proche), far transfer (transfert éloigné), context specific (spécifique au contexte), task specific (spécifique à la tâche), domain general (domaine général), domain specific (spécifique à au domaine), transversal (transversal), school learning (apprentissage scolaire), problem solving (résolution de problème), reading (lecture) et counting mathematics (calcul). Ensuite, un affinage des termes obtenus a été réalisé. Premièrement, en recourant aux outils de l'algorithme de recherche tel que l'astérisque, afin d'obtenir les variations pertinentes autour d'un même terme sans avoir à chercher toutes ces variations, comme le pluriel, le féminin, etc. Par exemple, pour le concept d'inhibition dans le thème des FE, il était nécessaire d'avoir, en anglais, le terme inhibition mais aussi inhibitory (inhibiteur). Ainsi, dans l'algorithme de recherche, a été utilisé inhibit* qui permet de couvrir ces deux variations autour du concept d'inhibition.

Deuxièmement, en procédant à un choix stratégique des expressions synonymes. La première possibilité était de conserver toutes les expressions spécifiques en les mettant entre guillemets dans l'algorithme de recherche afin de s'assurer que la recherche se réalise sur la base de l'expression exacte et non des termes qui la composent. Dans ce cas, les mots qui composent l'expression, pris isolément, ont été retirés de l'algorithme de recherche afin de s'assurer que seuls les résultats avec les expressions exactes ressortent. Par exemple, pour le concept même de FE, initialement avaient été introduits les expressions et termes suivants : executive (exécutif), executive function (fonction exécutive), executive functions (fonctions exécutives) et executive functioning (fonctionnement exécutif). Afin d'optimiser l'obtention de résultats pertinents, il a été choisi de garder les expressions spécifiques et d'exclure le terme générique executive (exécutif) qui pourrait amener des résultats bibliographiques sans lien avec les FE. La seconde possibilité était de conserver seulement le terme générique, partant du principe que toute occurrence de ce terme devrait amener une

étude à figurer dans les résultats bibliographiques. Ce choix semblait le plus approprié quand le terme en question est fortement associé au domaine de recherche pertinent, et qu'il ne risque donc pas de générer des résultats bibliographiques trop éloignés des besoins. C'est par exemple le cas pour le concept du contrôle inhibiteur. Les expressions initialement identifiées comme pertinentes étaient inhibition (inhibition), inhibitory control (contrôle inhibiteur), cognitive inhibition (inhibition cognitive), motor inhibition (inhibition motrice) et behavioral inhibition (inhibition comportementale). Le terme inhibition est fréquemment employé comme synonyme de contrôle inhibiteur, donc pour désigner la FE. En somme, le terme inhibition seul était indispensable. Par ailleurs, il semblait difficile de faire une liste exhaustive de toutes les variantes du concept d'inhibition. Certaines avaient été identifiées, comme l'inhibition motrice ou l'inhibition cognitive, mais il n'est pas rare de voir de nouveaux adjectifs accolés au terme inhibition. Ainsi, se focaliser sur les expressions exactes présentait un risque de passer à côté de certains résultats bibliographiques. Dans la mesure où ce concept est très lié aux domaines de la psychologie et des neurosciences, il semblait raisonnable de se limiter aux termes inhibition (inhibition) et inhibitory (inhibiteur), eux-mêmes fusionnés dans inhibit* comme expliqué plus haut. Ainsi, toutes les études utilisant n'importe quelle expression contenant la racine inhibit devrait faire partie des résultats bibliographiques.

Tableau 3.1

Algorithme de recherche bibliographique en anglais développé pour la méta-analyse.

Thème / Bases	PubMed	Education Source	PsycInfo	ERIC
Fonctions exécutives (dans le résumé)	("executive function" OR "executive functions" OR "executive functioning"			
	OR "working memory" OR updating			
	OR inhibit* OR "self-control" OR "self regulat*" OR interference* OR attention OR control			
	OR flexibility OR shifting OR cognit*)			
Entraînement (dans le résumé)	AND (training OR intervention)			
Transfert (pas de champ spécifié)	AND ("transfer of learning" OR "near transfer" OR "far transfer"			
	OR "context specific" OR "task specific" OR "domain general" OR "domain specific" OR transvers*			
	OR "school learning" OR "problem solving" OR reading OR "counting mathematics")			
Méthodologie expérimentale (pas de champ spécifié)	AND (pre-test OR pretest OR post-test OR control			
	OR experiment* OR quasi-experiment* OR clinical OR condition OR randomi*)			
	OR variance OR "quantitative method")			
Exclusions (dans le titre)	NOT (disorder* OR syndrome* OR disease* OR schizophrenia OR alzheimer OR parkinson OR cancer* OR tumor*			
	OR cell* OR protei* OR peptid* OR ester)			
Filtres	humains, revues avec comité de lecture, texte en anglais ou français			

Par la suite, l'algorithme a été testé, c'est-à-dire qu'il a été utilisé dans certaines des bases de données envisagées afin de connaître la quantité de résultats qu'il générerait. Cette quantité était trop importante pour être traitée efficacement (à titre d'exemple, 109808 articles pour la base Education Source). En conséquence, de nouveaux choix stratégiques ont dû être opérés pour réduire la quantité de résultats bibliographiques, sans pour autant perdre du contenu pertinent. La première solution fut d'ôter certains termes de recherche dans le thème de l'entraînement. Initialement, ce thème contenait

les expressions training (entraînement), intervention, teaching (enseignement), learning (apprentissage), educat* (éducat*), develop* et improv* (amélior*). Certains termes, qui semblent pertinents quand il s'agit d'entraînement cognitif, *a fortiori* quand les effets ont été observés sur des performances scolaires, font ressortir aussi beaucoup d'articles sans lien avec l'entraînement cognitif. Il a donc été décidé de ne conserver, pour ce thème, que les termes training (entraînement) et intervention.

La seconde solution fut de sélectionner les champs de recherche des mots-clés composant l'algorithme de recherche (comme présenté dans le Tableau 3.1). Concrètement, pour chacun des quatre thèmes composant l'algorithme de recherche, il fut décidé quel serait le champ des articles où les termes devraient apparaître. Pour le thème des FE, un des termes devait apparaître dans le titre ou le résumé. Cela se justifie par la place centrale de ce thème dans la recherche envisagée et en entraînement cognitif en général. En conséquence, si aucun terme identifié et retenu en lien avec les FE n'apparaît dans le titre ou le résumé d'un article, il semble peu probable que cet article soit pertinent pour la méta-analyse. Pour le thème de l'entraînement, le champ de recherche a aussi été limité au titre et au résumé. Le but de cette recherche bibliographique est de collecter des études d'entraînement. Donc, de la même façon que pour les FE, si aucun des termes identifiés et retenus en lien avec l'entraînement ne figure dans le titre ou le résumé d'un article, il est peu probable qu'il s'agisse d'une étude d'entraînement. Pour les thèmes du transfert et de la méthodologie expérimentale, aucun champ de recherche n'a été spécifié. Ce choix repose sur le fait qu'il est peu probable que ces concepts soient abordés dans le résumé de façon systématique. Pour autant, il pourrait s'agir d'études d'entraînement cognitif. Le but étant de conserver tout le contenu pertinent, il semble préférable de ne pas spécifier de champ de recherche pour ces thèmes. Enfin, même si ce n'est pas un thème dans l'algorithme de recherche, un champ de recherche a aussi été spécifié pour les exclusions, en l'occurrence dans le titre (comme présenté dans le Tableau 3.1). Ainsi, toute étude dont le titre contient un des termes identifiés comme non désirables sera

exclue des résultats bibliographiques. Le choix de se concentrer sur la présence des termes exclus dans le titre se justifie par le fait que le titre contient, en général, les mots les plus représentatifs du thème d'une recherche. En conséquence, si un article contenait un de ces termes, il semble très probable qu'il s'intéresse à des sujets ou des populations non visées par la méta-analyse. D'où la pertinence de les exclure d'emblée. Par ailleurs, concernant les exclusions, le premier test de l'algorithme de recherche a révélé, sur la base de données PubMed, de nombreuses études en chimie et en biologie, donc sans lien avec les objectifs de recherche. Une liste des termes apparaissant fréquemment dans les titres de ces articles (par exemple ester, cellule, peptide) a été réalisée et l'algorithme de recherche, dans la section exclusions, a été modifié en conséquence.

L'algorithme de recherche bibliographique a été utilisé dans les bases de données bibliographiques suivantes : ERIC, Education Source, PsycInfo et PubMed. Ces bases de données ont été retenues pour leur pertinence sur le sujet traité, ainsi que leur capacité à fournir des résultats tenant compte de l'algorithme de recherche utilisé. Google Scholar n'a pas été retenu, car l'interface de recherche, en mode classique comme avancé, ne permet pas d'entrer un algorithme de recherche contenant autant de termes. En conséquence, les résultats de recherche obtenus avec Google Scholar n'auraient que partiellement correspondu aux mots et expressions sélectionnés, ce qui aurait biaisé les résultats et créé une divergence par rapport aux autres bases de données utilisées.

Certaines restrictions ont été ajoutées, après avoir obtenu les premiers résultats de l'algorithme de recherche, dans le but de se limiter aux résultats pertinents pour le sujet traité (comme présenté dans le Tableau 3.1). Toutes les études doivent avoir été réalisées avec des humains. Autrement dit ont exclues toutes les études sur l'apprentissage animal, qui est un domaine de recherche assez présent dans la base de données PubMed notamment. De plus, toutes les études retenues devaient avoir fait

l'objet d'une relecture par les pairs. Cette exigence permet de s'assurer que les recherches composant la méta-analyse sont des recherches scientifiquement validées. En conséquence, les thèses, mémoires, livres et chapitres de livres n'ont pas été inclus dans la méta-analyse. Enfin, seules les études dont le texte intégral est rédigé en anglais ont été sélectionnées. Cette limite permettait de s'assurer que le contenu des études retenues soit parfaitement intelligible à toute personne ayant à en extraire les informations pertinentes.

Les résultats obtenus avec cet algorithme de recherche ont permis d'identifier les études disponibles dans les bases de données sélectionnées. Il est impossible de prétendre avoir trouvé toutes les études pertinentes. Bien que l'algorithme de recherche se veuille le plus complet possible, il est toujours possible que certains synonymes n'aient pas été inclus. De plus, ce processus de collecte de données — parcourir les bases de données — est biaisé : seuls les résultats publiés sont accessibles. S'il existe des études d'entraînement cognitif non publiées, elles ne peuvent pas apparaître dans les résultats. Cependant, les résultats non publiés sont généralement des résultats négatifs. Si ce biais existe pour ce domaine de recherche, son impact devrait être minimisé par la présence déjà importante d'études aux résultats négatifs. Surtout, la méta-analyse envisagée cherche surtout à réétudier ce qui a déjà été publié, notamment au regard du transfert, afin d'identifier s'il est possible de l'interpréter autrement. Il s'agit donc de repartir des études publiées. Le but n'est pas de trouver de nouvelles tailles d'effet pour le transfert proche et le transfert éloigné, mais, d'après les recherches existantes, de déterminer quels niveaux de transfert relatif sont atteignables en dégagant un portrait plus précis du transfert. C'est pourquoi l'utilisation d'études non publiées ne semble pas indispensable.

Par ailleurs, un moyen complémentaire de collecte bibliographique a été utilisé. Il s'agit de rassembler les méta-analyses déjà réalisées sur le thème de l'entraînement cognitif et de comparer les études d'entraînement cognitif qu'elles ont utilisées avec celles

obtenues par la recherche bibliographique. Toute étude ne faisant pas partie des résultats de recherche bibliographique a ainsi été ajoutée au corpus d'articles préliminaire.

La recherche bibliographique a ainsi permis de réunir 21230 études. Le diagramme PRISMA-P (Moher *et al.*, 2009) a servi de guide aux différentes étapes de sélection (voir Figure 2.4). Après l'exclusion des doublons (6697), les critères d'inclusion ont été appliqués aux titres, aux résumés puis aux textes intégraux. Ces critères ont été déterminés en fonction des objectifs de recherche. Concernant les populations visées, seules des populations typiques ont été retenues, puisque l'interrogation portait sur l'efficacité intrinsèque des entraînements cognitifs; l'impact sur des populations atypiques pourrait différer. Concernant le protocole de recherche, ont été exclues les études qui n'ont pas eu recours à un groupe contrôle, même passif, car il devient alors difficile de déterminer si les effets observés sont réellement causés par l'entraînement. Ont aussi été exclues les études corrélationnelles, car une même méta-analyse ne peut combiner des études expérimentales et corrélationnelles : ce sont des données incompatibles dans les formules de calcul. Considérant que les études expérimentales apportent un élément de causalité que ne peuvent fournir les études corrélationnelles, les études expérimentales ont été privilégiées. Concernant les données, les articles devaient fournir les éléments statistiques indispensables à la réalisation d'une méta-analyse. Moyennes, écarts-types et tailles d'échantillons pour les différentes mesures réalisées sont les éléments idéaux, mais les tailles d'effet, les t des tests t ou les f des ANOVA sont aussi utilisables (Littell *et al.*, 2008). Considérant les objectifs de la recherche, il était impératif, pour qu'une étude soit retenue, qu'elle ait utilisé au moins une mesure neurocognitive des FE. Enfin, il était nécessaire que les études en question aient réalisé une mesure des performances sur la tâche d'entraînement et une mesure de transfert, de façon à ne pas confondre l'effet de transfert avec l'effet d'entraînement. Ainsi, ce processus a permis de sélectionner 103 études d'entraînement cognitif, comme le montre la Figure 3.1.

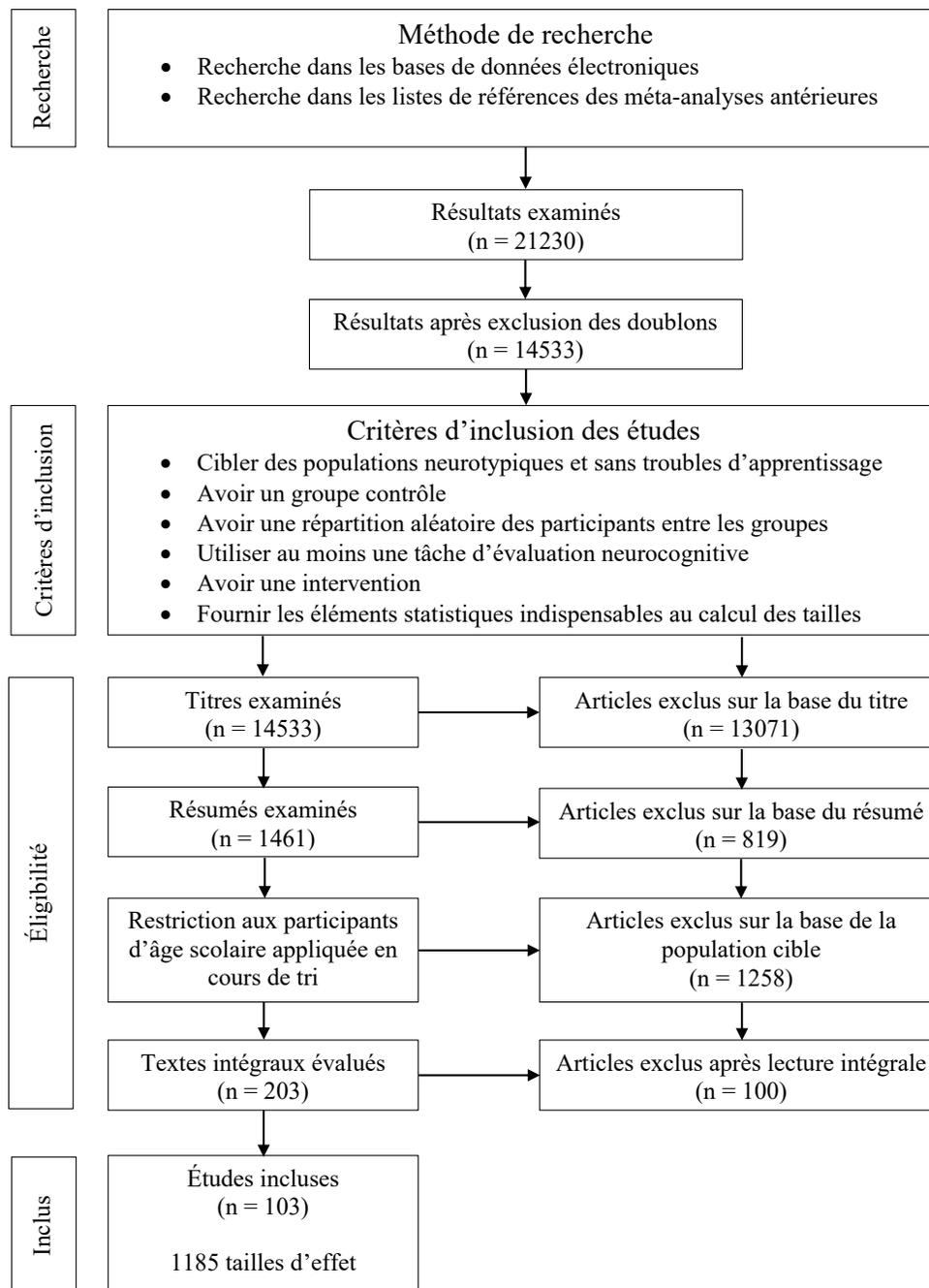


Figure 3.1 – Diagramme illustrant les étapes de sélection des études. Adapté de « Preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses: The PRISMA statement », par Moher, D., Liberati, A., Tetzlaff, J., Altman, D. G. pour le groupe PRISMA, 2009, *BMJ*, 339, b2535.

Afin de s'assurer de la validité du tri parmi les études et permettre à deux personnes de le réaliser, le critère de la fidélité interjuges a été retenu. À l'étape du tri sur la base du résumé, un échantillon de 30 articles a été créé afin que deux personnes jugent, indépendamment, si les articles devaient être retenus ou non (Littell *et al.*, 2008). Les sélections opérées étaient similaires à 93,3%, de plus les désaccords ont été discutés jusqu'à obtenir un consensus sur le classement de chacun des articles concernés en se référant toujours aux critères de sélection fixés en amont (Clark *et al.*, 2016). Le corpus d'articles ainsi créé (voir tableau 3.2) doit être relativement complet pour permettre de satisfaire les objectifs de recherche.

Tableau 3.2

Liste des études retenues pour la méta-analyse

Numéro de l'étude	1er auteur	Année de publication	Pays	k (nombre de tailles d'effet par étude)	Groupe contrôle actif	Niveau scolaire
1	Swanson	2018	États-Unis d'Amérique	8	Non	Primaire
2	Zelazo	2018	États-Unis d'Amérique	18	Oui	Maternelle
3	Alloway	2013	Grande-Bretagne	10	Oui	Primaire
4	Artuso	2019	Italie	6	Oui	Primaire
5	Aydmune	2019	Argentine	24	Oui	Primaire
6	Bergman Nutley	2011	Suède	27	Oui	Maternelle
7	Hitchcock	2016	Australie	12	Oui	Secondaire
8	Barnes	2016	États-Unis d'Amérique	8	Oui	Maternelle
9	Blakey	2015	Grande-Bretagne	6	Oui	Maternelle
10	Bowmer	2018	Grande-Bretagne	18	Non	Maternelle
11	Cartwright	2020	États-Unis d'Amérique	5	Non	Primaire
12	Charest-Girard	2017	Canada	7	Non	Primaire
13	Cornoldi	2015	Italie	4	Non	Primaire
14	D'Souza	2018	Canada	28	Non	Primaire
15	Da Silva	2017	Brésil	15	Non	Maternelle
16	Dias	2017	Brésil	28	Oui	Primaire
17	Dörrenbächer	2014 a	Allemagne	8	Oui	Primaire
18	Dörrenbächer	2014 b	Allemagne	8	Oui	Primaire
19	Espinet	2013	Canada	6	Oui	Maternelle
20	Foy	2014	États-Unis d'Amérique	11	Non	Maternelle
21	Goldin	2013	Argentine	18	Oui	Primaire
22	Hassler Hallstedt	2018	Suède	36	Oui	Primaire
23	Henry	2014	Grande-Bretagne	8	Oui	Primaire
24	Holmes	2009	Grande-Bretagne	9	Oui	Primaire
25	Honoré	2017	Belgique	11	Oui	Maternelle
26	Howard	2017 a	Australie	6	Oui	Maternelle
27	Howard	2017 b	Australie	3	Oui	Maternelle
28	Howard	2017 c	Australie	3	Oui	Maternelle
29	Jaschke	2018	Pays-Bas	10	Oui	Primaire
30	Johann	2019	Allemagne	48	Oui	Primaire
31	Kafadar	2015	Turquie	20	Non	Primaire
32	Kamijo	2011	États-Unis d'Amérique	1	Non	Primaire
33	Karbach	2015	Allemagne	6	Oui	Primaire
34	Korzeniowski	2017	Argentine	10	Non	Primaire
35	Kroesbergen	2014	Pays-Bas	8	Non	Maternelle
36	Kuhn	2014	Allemagne	4	Oui	Primaire
37	Kyttälä	2015	Finlande	14	Oui	Maternelle
38	Lee	2007	Taiwan	8	Non	Primaire

Numéro de l'étude	1er auteur	Année de publication	Pays	k (nombre de tailles d'effet par étude)	Groupe contrôle actif	Niveau scolaire
39	Lillard	2006	États-Unis d'Amérique	8	Non	Maternelle
40	Liu	2015 a	Chine	5	Oui	Maternelle
41	Liu	2015 b	Chine	5	Oui	Maternelle
42	Mackey	2011	États-Unis d'Amérique	7	Oui	Primaire
43	Mayoral-Rodriguez	2015	Espagne	9	Non	Maternelle
44	Messer	2018	Grande-Bretagne	6	Non	Primaire
45	Nemmi	2016	Suède	3	Oui	Primaire
46	Nemmi	2016 b	Suède	3	Oui	Primaire
47	Nevo	2013	Israël	40	Oui	Primaire
48	Passolunghi	2014	Italie	10	Oui	Maternelle
49	Pears	2014	États-Unis d'Amérique	6	Non	Maternelle
50	Peng	2017	États-Unis d'Amérique	16	Oui	Primaire
51	Ramani	2019	États-Unis d'Amérique	24	Oui	Maternelle
52	Röthlisberger	2011	Allemagne	6	Non	Maternelle
53	Röthlisberger	2011 b	Allemagne	6	Non	Primaire
54	Rueda	2012	Espagne	11	Oui	Maternelle
55	Sánchez-Pérez	2018	Espagne	22	Oui	Primaire
56	Siu	2018	Honk Kong	16	Oui	Primaire
57	Saint Clair-Thompson	2010	Grande-Bretagne	8	Non	Primaire
58	Thorell	2009	Suède	32	Oui	Maternelle
59	Tominey	2011	États-Unis d'Amérique	4	Non	Maternelle
60	Traverso	2015	Italie	15	Non	Maternelle
61	Volckaert	2015	Belgique	14	Oui	Maternelle
62	Wang	2019	Chine	3	Oui	Primaire
63	Zhang	2019	Chine	16	Oui	Primaire
64	Zhao	2015	Chine	12	Oui	Primaire
65	Zhao	2018	Chine	5	Oui	Primaire
66	Zhao	2018 b	Chine	7	Oui	Primaire
67	Astle	2015	Grande-Bretagne	1	Oui	Primaire
68	Blair	2014	États-Unis d'Amérique	16	Non	Maternelle
69	Gallota	2015	Italie	6	Oui	Primaire
70	Hillman	2014	États-Unis d'Amérique	10	Non	Primaire
71	Pirrie	2012	Canada	4	Non	Primaire
72	Pesce	2013	Italie	2	Oui	Primaire
73	Jager	2014	Suisse	10	Oui	Primaire
74	Poehlmann-Tynan	2016	États-Unis d'Amérique	6	Non	Maternelle
75	Schmidt	2016	Suisse	9	Oui	Primaire
76	Pesce	2016	Italie	6	Non	Primaire

Numéro de l'étude	1er auteur	Année de publication	Pays	k (nombre de tailles d'effet par étude)	Groupe contrôle actif	Niveau scolaire
77	Gallota	2015 b	Italie	6	Oui	Primaire
78	Schmidt	2015	Suisse	3	Non	Primaire
79	Purohit	2017	Inde	11	Non	Secondaire
80	Parker	2014	États-Unis d'Amérique	9	Non	Primaire
81	Kraft	2014	États-Unis d'Amérique	10	Oui	Primaire
82	Flook	2015	États-Unis d'Amérique	16	Non	Maternelle
83	Fisher	2011	Grande-Bretagne	13	Oui	Primaire
84	Farran	2014	États-Unis d'Amérique	17	Non	Maternelle
85	Chen	2014	Chine	12	Oui	Primaire
86	Chen	2014 b	Chine	12	Oui	Primaire
87	Zinke	2012	Allemagne	36	Oui	Primaire
88	Wimmer	2016	Allemagne	30	Oui	Primaire
89	Thibodeau	2016	États-Unis d'Amérique	16	Oui	Maternelle
90	Schonert-Reichl	2015	Canada	3	Non	Primaire
91	Dalziel	2015	Grande-Bretagne	5	Non	Primaire
92	Crova	2014	Italie	1	Non	Primaire
93	Alloway	2012	États-Unis d'Amérique	4	Oui	Secondaire
94	Hill	2016	États-Unis d'Amérique	8	Non	Secondaire
95	Zhao	2019	Chine	2	Oui	Secondaire
96	Lin	2018	Taiwan	10	Oui	Secondaire
97	Dias	2015	Brésil	33	Non	Maternelle
98	Abdi	2016	Iran	9	Non	Primaire
99	Schmidt	2015 b	Suisse	26	Non	Primaire
100	Davis	2007	États-Unis d'Amérique	8	Non	Primaire
101	Caviola	2009	Italie	5	Oui	Primaire
102	Zhang	2017	Chine	5	Oui	Primaire
103	Rode	2014	États-Unis d'Amérique	6	Non	Primaire
Total				1185		

3.3 Codage des données extraites des études collectées

L'étape suivant la création du corpus définitif des études d'entraînement cognitif était l'extraction et le codage des informations pertinentes. À cette fin, un tableau de codage a été réalisé en se basant sur les méta-analyses antérieures, notamment celle de Kassai et ses collaborateurs (2019). Il a été complété des éléments extraits de la typologie du transfert de Barnett et Ceci (2002). Le tableau de codage est divisé en plusieurs catégories. Il y a tout d'abord les informations bibliographiques, à savoir le nom du premier auteur de l'étude, l'année et le pays de publication (voir le Tableau 3.3). L'intérêt de ces données est d'obtenir des informations sur l'étude en elle-même, pour pouvoir les situer chronologiquement et géographiquement si le besoin d'en comparer survenait. Le codage utilise les éléments mentionnés dans l'article.

Tableau 3.3

Tableau de codage des données bibliographiques

Informations bibliographiques		
1er auteur	année de publication	pays de collecte

Venaient ensuite les caractéristiques de l'échantillon, c'est-à-dire l'âge des participant·e·s, notamment afin de déterminer si l'efficacité des entraînements varie notamment en fonction de l'âge où il est réalisé. En raison des mentions non uniformes de l'âge dans les diverses études (p. ex., âge exact, tranches d'âge), il a été choisi de seulement retenir le niveau scolaire des participant·e·s. Ainsi, l'âge est retranscrit à travers la variable « école » qui servait à indiquer si les participant·e·s étaient en maternelle, en primaire ou au secondaire.

La catégorie d'informations suivante concerne le protocole expérimental, et plus spécifiquement le type de groupe contrôle (voir le Tableau 3.4). Cette information a été relevée afin d'identifier les études recourant à des groupes contrôle passif et actif, mais aussi pour différencier les types de groupes contrôle actifs utilisés pour pouvoir vérifier si cela affecte les résultats aux évaluations suivant les entraînements. Le codage repose sur un système binaire avec 0 pour élément absent de l'étude et 1 élément présent dans l'étude pour les variables « groupe contrôle passif » et « groupe contrôle actif ». La variable « type de groupe contrôle » fusionne les deux précédentes tout en apportant plus d'informations. Un système de codes allant de 0 à 4 a été fixé, où 0 signifie groupe contrôle passif, 1 une activité ayant un très faible impact sur les FE, 2 un impact important sur les FE, 3 un entraînement cognitif direct et 4 un entraînement non cognitif direct. La valeur du code n'a pas de signification particulière. Cela permet juste d'opérer une distinction en fonction du type de groupe contrôle.

Tableau 3.4

Tableau de codage du protocole expérimental

Design de l'étude		
Groupe contrôle passif	Groupe contrôle actif	Type groupe contrôle

Ensuite viennent les informations relatives à l'entraînement, à savoir les FE ciblées, le type d'entraînement, le fait qu'il soit adaptatif ou non, c'est-à-dire que le niveau de difficulté est adapté à chaque séance au niveau des participant·e·s, sa durée, sa fréquence et les modalités utilisées (p. ex., ordinateur, livre, enregistrement audio; voir le Tableau 3.5). Relever la composition de l'entraînement est important pour ensuite déterminer l'éloignement avec les tâches d'évaluation réalisées en pré et post-test. Savoir si l'entraînement est adaptatif sera utile pour éventuellement différencier les

études sur ce critère, qui pourrait avoir un impact sur l'efficacité des entraînements et du transfert. Le codage de cette catégorie repose sur un code binaire pour dire si la caractéristique est présente ou absente, ou l'information exacte issue de l'article selon la variable.

Tableau 3.5

Tableau de codage de l'entraînement

Entraînement										
De plusieurs FE ?	De la mémoire de travail?	Du contrôle inhibiteur?	De la flexibilité cognitive?	D'une FE supérieure?	Type	Variation de la difficulté	Durée totale	Fréquence	Modalité de la tâche	Modalité de la réponse

La quatrième catégorie d'informations concerne les évaluations pré et post-test. Pour le codage de cette catégorie, une seule variable a été créée : elle permet de coder la mesure d'évaluation. Il s'agit d'identifier la cible de l'évaluation. Il y a six codes possibles : mémoire de travail, contrôle inhibiteur, flexibilité cognitive, FE de haut niveau (nommée supérieure dans le tableau pour des raisons purement pratiques), comportement et performances scolaires. Ces données sur les évaluations permettent d'avoir une trace précise des FE ou compétences sur lesquelles les chercheurs voulaient voir un effet positif suite à l'entraînement cognitif, et donc de voir si ce sont les mêmes que celles entraînées ou non.

Concernant le transfert à proprement parler, la grille de codage reprend et ajuste aux besoins de la présente méta-analyse le tableau de la typologie du transfert de Barnett et Ceci (2002) exposé dans le cadre conceptuel. Ladite typologie n'a pas pu être gardée intacte, car elle ne proposait pas de code pour la FE ou le processus cognitif, variables importantes dans cette méta-analyse. De plus, la variable changement dans la performance, qui devrait servir à indiquer si c'est la vitesse d'exécution ou le taux

d'exactitude qui se sont améliorés, s'est avérée difficile à coder par manque d'information dans les études d'entraînement cognitif et aussi à cause de l'utilisation de tâches trop dissemblables lors de l'entraînement et l'évaluation pour coder ce paramètre. Par ailleurs, à la suite de la lecture de plusieurs études d'entraînement cognitif, il est apparu difficile de coder les modalités de la tâche dans une seule variable, sachant que fréquemment la présentation de la tâche et l'action demandée aux participant·e·s diffèrent. Par exemple, proposer un exercice sur ordinateur, mais demander de répondre à l'oral ou bien sur le clavier. En conséquence, la modalité de la tâche et la modalité de la réponse ont été séparées. Encore, toujours pour les variables de modalité, les entraînements et les évaluations leur faisant suite regroupant le plus souvent plusieurs tâches, il était difficile de dégager une modalité globale. Il pouvait y avoir une tâche demandant de répondre à l'oral, une autre par écrit, et une autre enfin sur un clavier d'ordinateur. C'est pourquoi, pour ces variables de modalité un code binaire a été adopté, c'est-à-dire que l'information codée est le fait que soit identique ou différent entre l'entraînement et l'évaluation sans plus de détail. Enfin, pour le contexte social, il a été remarqué que cela couvrait le contexte de travail (est-ce que les participant·e·s travaillent seul·e·s, en dyades, en groupes?), mais aussi le contexte social général (l'enfant est-il seul dans la pièce ou plutôt en classe?). En conséquence, ces aspects ont été séparés en deux variables : le contexte social pour le premier et l'environnement social pour le second.

Ainsi, les variables du transfert retenues sont la FE, le processus cognitif, la demande en mémoire et le domaine de connaissances pour le contenu du transfert, l'environnement social, le contexte social, le contexte temporel, le contexte fonctionnel, le contexte physique, la modalité des tâches et la modalité de réponse aux tâches pour le contexte du transfert (voir le Tableau 3.6). Il faut préciser que la catégorisation ou la qualification du transfert éventuellement réalisée par les auteurs des études d'origine a été ignorée. Cela vise à ne pas être influencé par ces catégorisations d'origine, mais aussi permettre d'avoir tous les niveaux de transfert

possible qui sont généralement absents des études d'entraînement cognitif. Le codage s'est fait selon les niveaux dégagés par Barnett et Ceci (2002) et en s'en inspirant pour les variables ajoutées. Concrètement, pour la FE et le processus cognitif, le codage est binaire : 0 pour indiquer que c'est la même chose pendant l'entraînement et l'évaluation et 1 quand c'est différent. Pour la demande en mémoire, il y a trois niveaux, allant du transfert le plus proche au plus éloigné. Pour le transfert du contexte, il y a cinq niveaux, avec, à nouveau, le premier niveau correspondant au transfert le plus proche et le dernier au plus éloigné. Seules les variables liées aux modalités de travail ont été codées de façon binaire sur le principe d'identique-différent, car il était en pratique difficile de dégager un nombre raisonnable de niveaux, comme cela a déjà été mentionné.

Tableau 3.6

Tableau de codage du transfert

Transfert										
FE	Processus cognitif	Demande en mémoire	Environnement social	Contexte social	Modalité		Contexte physique	Contexte temporel	Contexte fonctionnel	Domaine de connaissances
					Tâche	Réponse				

Le codage de la section du transfert repose sur une évaluation par les codeurs du degré d'éloignement entre l'entraînement et l'évaluation. Ainsi, un code 0 pour les variables binaires et un code 1 pour les autres variables signifient que l'entraînement et l'évaluation étaient semblables, par exemple que cela avait lieu dans la même salle, ou le même jour. Les autres codes signifient qu'il y a plus ou moins d'éloignement entre l'entraînement et l'évaluation. Ainsi un degré 5 signifie des conditions très différentes par exemple sur le lieu de passation des tâches, comme faire l'entraînement à l'école et faire l'évaluation dans un laboratoire de recherche.

Pour finir ont été extraits les éléments statistiques pertinents. Il s'agit principalement des moyennes, écarts-types et tailles d'échantillon pour chacune des mesures réalisées dans les études retenues à la suite de la collecte bibliographique (voir le Tableau 3.7). Ces données servent à calculer les tailles d'effet lorsqu'elles ne sont pas déjà calculées. Il faut noter que les t et les F pertinents sont seulement ceux servant à comparer deux groupes. Par ailleurs, ces données ont été codées de façon à ce qu'une taille d'effet positive représente une amélioration, impliquant un meilleur score en post-test qu'en prétest, ce qui a nécessité pour certaines mesures d'inverser les scores.

Tableau 3.7

Tableau de codage des données statistiques

Données statistiques														
n_{GE} pré	M_{GE} pré	ET_{GE} pré	n_{GE} post	M_{GE} post	ET_{GE} post	n_{GC} pré	M_{GC} pré	ET_{GC} pré	n_{GC} post	M_{GC} post	ET_{GC} post	t	F	d

Note : n = taille de l'échantillon ; GE = groupe expérimental ; M = moyenne ; ET = écart-type ; GC = groupe contrôle ; t = résultat d'un test t ; F = résultat d'une ANOVA ; d = taille d'effet.

3.4 Analyses réalisées

3.4.1 Calcul des tailles d'effet

Les analyses ont été réalisées avec le logiciel R (R Core Team, 2021). Dans un premier temps, des tailles d'effet de type g de Hedges (Hedges, 1981) pour chacune des mesures des 103 études de la base de données ont été calculées (Clark *et al.*, 2016), donnant 1185 tailles d'effet. Il s'agit de différences entre les moyennes standardisées du changement pré-post pour chaque groupe puis entre les groupes, calculées selon la formule suivante (Hedges, 1981):

(1)

$$g = \left[1 - \left(\frac{3}{4N - 9} \right) \right] \times d$$

où N est la taille totale de l'échantillon, donc groupe expérimental et groupe contrôle cumulés, et d la taille d'effet pour la mesure concernée, qui se calcule comme suit (Glass *et al.*, 1981):

$$d = \left(\frac{\bar{X}_{GE} - \bar{X}_{GC}}{ET_{pond}} \right)_{POST} - \left(\frac{\bar{X}_{GE} - \bar{X}_{GC}}{ET_{pond}} \right)_{PRÉ} \quad (2)$$

où \bar{X}_{GE} est la moyenne pour le groupe expérimental et \bar{X}_{GC} la moyenne pour le groupe contrôle, et ET_{pond} est l'écart-type pondéré qui se calcule avec la formule suivante :

$$ET_{pond} = \sqrt{\frac{(N_{GE} - 1)ET_{GE}^2 + (N_{GC} - 1)ET_{GC}^2}{(N_{GC} + N_{GE} - 2)}} \quad (3)$$

Dans certaines études, les mesures étaient uniquement réalisées en post-test. Dans ce cas, la taille d'effet consiste en la différence entre la moyenne du groupe expérimental et la moyenne du groupe contrôle en post-test uniquement. La taille d'effet de type d a été calculée grâce à la formule suivante (Glass *et al.*, 1981) avant d'être convertie en g avec la formule 1:

$$d = \frac{(\bar{X}_{GE} - \bar{X}_{GC})}{ET_{pond}} \quad (4)$$

Dans les cas où pour certaines mesures à l'intérieure d'une étude, il n'y avait des données qu'en suivi, ces données étaient traitées comme un post-test. De façon similaire, lorsque les résultats étaient rapportés sous la forme d'un gain moyen pour chaque groupe, c'est-à-dire que la différence entre la performance moyenne au post-

test et celle au prétest avait déjà été calculée, la formule 3 a été utilisée pour calculer la taille d'effet avant d'appliquer la formule 1.

Pour certaines mesures, les tailles d'effet ont été calculées à partir du résultat d'une analyse de variance. Ainsi, avant de calculer le g , le d a été calculé de la façon suivante (Thalheimer et Cook, 2002):

$$d = \sqrt{F \left(\frac{n_{GE} + n_{GC}}{n_{GE} \times n_{GC}} \right) \left(\frac{n_{GE} + n_{GC}}{n_{GE} + n_{GC} - 2} \right)} \quad (5)$$

où n_{GE} est la taille de l'échantillon pour le groupe expérimental, n_{GC} est la taille de l'échantillon pour le groupe contrôle et F le résultat de l'analyse de variance. Pour d'autres, enfin, les tailles d'effet étaient fournies sous la forme d'un d de Cohen, qui ont été ensuite transformés en g selon la formule (1) donnée plus haut.

Le g de Hedges permet d'obtenir une taille d'effet standardisée, impliquant que le g est significatif si son intervalle de confiance ne contient pas le zéro. De plus, il permet de corriger pour la variabilité des tailles d'échantillons dans une méta-analyse afin de fournir des tailles d'effet non biaisées (Clark *et al.*, 2016).

Par ailleurs, il faut noter que les tailles d'effet calculées utilisent plusieurs mesures par participant·e, c'est-à-dire son score en prétest et celui en post-test. En conséquence, il existe une corrélation entre ces mesures. Il est en pratique impossible de savoir quelle est cette corrélation, car l'information n'est pas donnée par les études d'origine. En conséquence, un coefficient de corrélation conservateur de 0,8 a été choisi pour le calcul de toutes les tailles d'effet (Tipton, 2014).

3.4.2 Traitement des valeurs aberrantes

Par la suite, les valeurs aberrantes de la base de données globales ont été recherchées en utilisant le critère de l'écart interquartile (Walfish, 2006), une des procédures courantes d'identification des valeurs aberrantes. L'écart interquartile (IQR) est la différence entre le troisième quartile et le premier quartile. Autrement dit, les tailles d'effet ont été réparties en quatre quartiles et la taille d'effet moyenne obtenue pour le premier quartile a été soustraite à celle obtenue pour le troisième quartile afin d'obtenir l'IQR. Ensuite, le critère interquartile a été appliqué. Il définit un intervalle I qui s'écrit (6) ainsi :

$$I = [q_1 - 1,5 \times \text{IQR}; q_3 + 1,5 \times \text{IQR}]$$

où q_1 représente le premier quartile et q_3 le troisième. Ainsi, lorsqu'une mesure se trouve à l'extérieur de cet intervalle, elle est considérée comme une valeur aberrante. Concrètement, cela concerne toute taille d'effet qui est inférieure à la taille d'effet moyenne du premier quartile à laquelle a été soustraite 1,5 fois l'IQR ou supérieure à la taille d'effet moyenne du troisième quartile à laquelle a été ajoutée 1,5 fois l'IQR. Cette procédure a permis d'identifier 107 valeurs aberrantes. Dans la mesure où les analyses de sensibilité montraient que les résultats avaient une tendance à être plus significatifs en présence des valeurs aberrantes, elles ont été retirées de la base de données servant aux analyses. Cela laissait donc 1083 tailles d'effet.

3.4.3 Traitement de la dépendance des mesures

Les tailles d'effet obtenues ne sont pas indépendantes les unes des autres puisque chaque étude incluse dans la méta-analyse fournit plusieurs tailles d'effet basées sur le même groupe de participant·e·s. Ce manque d'indépendance peut mener, s'il est ignoré, à augmenter la chance d'obtenir des résultats significatifs, car les erreurs d'échantillonnage sont alors corrélées. Ce problème peut être contrôlé en utilisant un

estimé robuste de la variance (*robust variance estimation*) en contexte méta-analytique (Hedges, Tipton et Johnson, 2010). Cet estimé permet d'obtenir des intervalles de confiance et des valeurs de p robustes même quand les hypothèses habituelles des modèles linéaires ne sont pas vérifiées, notamment l'homoscédasticité, c'est-à-dire l'homogénéité de la variance résiduelle. L'estimé robuste de la variance a été utilisé dans le cadre d'un modèle à effets hiérarchiques corrélés (*correlated hierarchical effects*; Pustejovsky et Tipton, 2022) qui part du principe que les tailles d'effets à l'intérieur des études et entre les études sont corrélées et que cette corrélation est identique à travers et au sein des études (Harrer *et al.*, 2021). Le coefficient de corrélation retenu est celui conseillé par les auteurs pour son caractère conservateur raisonnable: $\rho = 0,6$. Un coefficient de corrélation fixe supposant une corrélation identique à l'intérieur et entre les études semble impropre à rendre la dépendance complexe présente au sein d'une méta-analyse. Cependant, comme démontré par ses créateurs (Pustejovsky et Tipton, 2022), le modèle à effets hiérarchiques corrélés, qui recourt à ce coefficient de corrélation prédéterminé, permet d'éviter de tirer des inférences surestimées (tels le p ou les intervalles de confiance) à cause d'une mauvaise spécification du modèle, suggérant donc qu'il permet de rendre relativement bien la dépendance complexe des données (Harrer *et al.*, 2021).

3.4.4 Calcul de scores de transfert globaux

Par la suite, un score de transfert global a été calculé. Il s'agit d'une procédure visant à dégager une variable unique représentant l'ampleur du transfert demandé dans les études pour chacune de leurs mesures d'évaluation. Cela a aussi été réalisé afin d'obtenir un score de transfert de contenu et un score de transfert de contexte, sur la base de la distinction opérée par Barnett et Ceci (2002). Lesdits scores de transfert ont été calculés si, pour une mesure d'évaluation donnée, plus des 2/3 des variables du transfert avaient un code, c'est-à-dire que l'étude d'origine donnait assez d'information pour coder les 2/3 des variables. La formule utilisée pour calculer un score de transfert

global pour chacune des mesures, ainsi qu'un score de transfert de contenu et un score de transfert de contexte est la suivante :

$$\text{score moyen de transfert} = \frac{\sum_{i=1}^{11} \frac{x_{Vi}}{y_{Vi}}}{N_{V_{\text{utilisées}}}} \quad (7)$$

où V_i est une variable donnée parmi les variables du transfert, x la valeur (le code) pour une mesure donnée pour la variable en question, y la valeur maximale que peut prendre une variable donnée selon l'échelle de codage utilisée, et $N_{V_{\text{utilisées}}}$ le nombre de variables utilisées pour calculer le score de transfert, c'est-à-dire le nombre de variables codées pour une mesure donnée.

Dans la mesure où pour chacune des variables du transfert il y avait une quantité assez importante de données manquantes, il semblait nécessaire de diviser le score total de transfert par le nombre de colonnes codées pour une mesure donnée pour ne pas avoir un score de transfert biaisé, ce qui revenait à calculer un score moyen de transfert. Ainsi, un score de transfert global a pu être calculé pour 681 mesures. Par ailleurs, les variables étant codées sur des échelles différentes (2 à 5), il était indispensable de ramener la valeur pour chaque variable sur une échelle commune. C'est pourquoi, pour chaque variable, sa valeur est divisée par la valeur maximale de la variable afin de ramener toutes les variables sur une échelle allant de 0 à 1.

Les scores de transfert globaux ainsi obtenus s'échelonnent de 0,170 à 0,886. La technique des quartiles a été utilisée pour déterminer comment répartir les scores de transfert global dans chaque niveau. Cette technique a permis de créer quatre groupes de scores consécutifs contenant chacun le même nombre de scores, donnant ainsi à chaque la même probabilité. Les groupes se répartissent comme suit :

- niveau 1 : scores de transfert inférieurs à 0,412;

- niveau 2 : scores de transfert supérieurs ou égaux à 0,412 et inférieurs à 0,503;
- niveau 3 : scores de transfert supérieurs ou égaux à 0,503 et inférieurs à 0,652;
- niveau 4 : scores de transfert supérieurs ou égaux à 0,652.

La même procédure a été appliquée aux variables liées au contenu transféré, c'est-à-dire la FE, le processus cognitif et la demande en mémoire. Un score de transfert de contenu a été calculé pour chaque mesure lorsqu'il y avait assez de données (1008 mesures). Les scores de transfert de contenu sont compris entre 0,133 et 1, ce qui donne dans les quatre niveaux :

- niveau 1 : scores de transfert inférieurs à 0,300;
- niveau 2 : scores de transfert supérieurs ou égaux à 0,300 et inférieurs à 0,667;
- niveau 3 : scores de transfert supérieurs ou égaux à 0,667 et inférieurs à 0,850;
- niveau 4 : scores de transfert supérieurs ou égaux à 0,850.

Enfin, cela a aussi été réalisé avec les variables liées au contexte du transfert, c'est-à-dire l'environnement social, le contexte social, le contexte physique, le contexte temporel, la modalité de la tâche, la modalité de la réponse, le contexte fonctionnel et les connaissances. Cela a permis d'obtenir un score de transfert de contexte pour chacune des mesures de la méta-analyse qui fournissaient assez de données (832 mesures). Le score de transfert de contexte minimum est de 0,161 et le maximum de 0,800. Les scores de transfert de contexte ont été répartis dans les niveaux suivants :

- niveau 1 : scores de transfert et inférieurs à 0,333;
- niveau 2 : scores de transfert supérieurs ou égaux à 0,333 et inférieurs à 0,458;
- niveau 3 : scores de transfert supérieurs ou égaux à 0,458 et inférieurs à 0,591;
- niveau 4 : scores de transfert supérieurs ou égaux à 0,591.

3.4.5 Comparaison des tailles d'effet selon les variables d'intérêts

Pour chaque variable d'intérêt, c'est-à-dire l'âge des participant·e·s, le type d'entraînement, la mesure d'évaluation, le nombre de FE entraînées, la variation du niveau de difficulté de l'entraînement, la fréquence et la durée de l'entraînement, le type de groupe contrôle utilisé, les 11 facteurs du transfert puis les scores de transfert, le modèle à effets hiérarchiques corrélés a été appliqué. Autrement dit, les tailles d'effet ont été regroupées selon les sous-catégories de chaque variable puis comparées. Le résultat de cette procédure est semblable à une analyse de variance, mais permet de contrôler pour le problème de dépendances dans les données de la méta-analyse sans avoir à supprimer ou agréger les données.

3.4.6 Recherche d'interactions entre les variables d'intérêt

Pour explorer les interactions entre des variables, la technique de l'ANOVA nichée (McDonald, 2014) a été retenue, car elle permet de prendre en compte la dépendance entre les mesures extraites d'une même étude en introduisant une hiérarchie forcée entre les facteurs de l'analyse. En l'occurrence, les mesures sont systématiquement rassemblées dans le facteur étude au premier niveau, et ensuite sont ajoutés les facteurs d'intérêt aux niveaux suivants.

CHAPITRE IV

RÉSULTATS

Dans ce chapitre sont présentés les résultats de la méta-analyse réalisée. Sont tout d'abord présentés les résultats des analyses des variables modératrices seules ou en interaction entre elles, afin de tenter de définir des facteurs liés à l'efficacité des entraînements cognitifs. Sont ensuite exposés les résultats des analyses pour les 11 facteurs du transfert retenus. Pour finir, sont proposés les résultats touchant aux scores de transfert dont le but était de tenter de dégager des niveaux de transfert complémentaires dans la dichotomie transfert proche-transfert éloigné.

4.1 Analyse des variables d'intérêt

Dans un premier temps, un effet propre de chaque variable d'intérêt a été exploré, c'est-à-dire que pour chacune de ces variables, les tailles d'effet appartenant à chaque sous-catégorie de la variable ont été comparées selon le modèle hiérarchique corrélé mentionné plus tôt. L'essentiel des résultats de ces analyses sont rassemblés dans le Tableau 4.1 ci-dessous.

Tableau 4.1.

Synthèse des résultats pour les variables catégorielles liées aux entraînements

Variables	Sous-catégories	\bar{g}	p	k
Âge	Maternelle	0,258 *	0,001	391
	Primaire	0,332 *	0,001	643
	Secondaire	0,304	0,084	46
Type d'entraînement	Cognitif direct	0,217 *	0,001	641
	Cognitif indirect	0,219 *	0,001	335
	Interventions sur l'environnement	0,188	0,062	104
Compétence évaluée	Mémoire de travail	0,321 *	0,001	243
	Contrôle inhibiteur	0,151 *	0,001	282
	Flexibilité cognitive	0,186 *	0,001	120
	FE supérieure	0,252 *	0,001	78
	Comportement	0,376 *	0,025	43
	Performances scolaires	0,169 *	0,001	178
Nombre de FE entraînées	Aucune	0,278 *	0,001	259
	Une	0,183 *	0,001	558
	Plusieurs	0,224 *	0,001	263
Variation de la difficulté	Aucune	0,427	0,19	8
	Augmentation prédéterminée	0,144	0,052	75
	Type adaptatif à la hausse	0,289 *	0,01	93
	Type adaptatif pur	0,174 *	0,001	393
Type de groupe contrôle	Passif	0,213 *	0,001	535
	Activité neutre pour les FE	0,235 *	0,005	358
	Tâche mobilisant les FE	0,068	0,395	23
	Entraînement cognitif direct allégé	0,202 *	0,002	125
	Entraînement cognitif indirect	0,186	0,602	39

Note. * = tailles d'effet significatives

Concernant l'âge des participant·e·s, les analyses montrent que les entraînements ont eu un effet pour les élèves de la maternelle ($\bar{g} = 0,258$; $p < 0,001$; $k = 391$) et du primaire ($\bar{g} = 0,332$; $p < 0,001$; $k = 643$). Pour les élèves du secondaire, l'effet est non significatif ($\bar{g} = 0,304$; $p = 0,084$; $k = 46$). Concrètement, cela signifie que les élèves de maternelle et primaire des groupes expérimentaux se sont plus améliorés que ceux des groupes contrôle à la suite des entraînements, tous entraînements confondus. Pour les élèves du secondaire, les résultats ne permettent pas de conclure à un effet significatif des entraînements. Cependant, il est pertinent de relever que le nombre de mesures pour les élèves de niveau secondaire ($k = 46$) est bien inférieur à celui des élèves de primaire ($k = 643$) et même de maternelle ($k = 391$). Cela pourrait expliquer l'absence de significativité. Par ailleurs, les analyses montrent qu'il n'y a pas de différences dans l'effet des entraînements entre les groupes de maternelle ou de primaire ($p = 0,360$). Autrement dit, les entraînements semblent avoir eu des effets similaires à la maternelle et au primaire.

La variable d'intérêt suivante est le type d'entraînement. Les analyses montrent que les entraînements cognitifs directs ($\bar{g} = 0,217$; $k = 641$) et les entraînements cognitifs indirects ($\bar{g} = 0,219$; $k = 335$) ont produit des effets positifs ($p < 0,001$). Autrement dit, ces deux types d'entraînements ont permis aux participant·e·s des groupes expérimentaux de s'améliorer davantage que ceux des groupes contrôle. Les interventions visant à modifier l'environnement ($\bar{g} = 0,188$; $k = 104$) obtiennent en effet presque significatif ($p = 0,062$). Il faut noter que le nombre de mesures pour ce dernier type d'entraînement est inférieur aux autres, ce qui peut avoir limité la détection d'un effet significatif. Par ailleurs, les effets obtenus ne sont pas significativement différents entre l'entraînement cognitif direct et l'entraînement cognitif indirect ($p = 0,647$). Cela signifie que les entraînements cognitifs direct et indirect auraient eu des effets similaires.

Une autre des variables d'intérêt est la compétence évaluée après l'entraînement, qui a six catégories : mémoire de travail ($\bar{g} = 0,321$; $k = 243$), contrôle inhibiteur ($\bar{g} = 0,151$; $k = 282$), flexibilité cognitive ($\bar{g} = 0,186$; $k = 120$), FE supérieure ($\bar{g} = 0,252$; $k = 78$), comportement ($\bar{g} = 0,376$; $k = 43$) et performance scolaire ($\bar{g} = 0,169$; $k = 178$). Les analyses montrent que les tailles d'effet moyennes pour toutes les mesures sont significatives ($p < 0,001$; comportement : $p = 0,025$). Concrètement, à la suite des entraînements, les performances des participants des groupes expérimentaux se sont plus améliorées que pour les groupes contrôle pour toutes les cibles d'évaluation. Il est important de préciser qu'une analyse de covariance a été réalisée pour la variable mesure avec les FE ciblées par les entraînements. Autrement dit, une analyse a été réalisée pour voir si l'impact sur les FE ciblées demeurerait significatif même lorsqu'on introduisait la FE entraînée en covariable, sachant que cela pouvait être la même ou non. L'analyse de covariance montre que la variable mesure demeure significative même quand on introduit la variable qui indique si c'est la même FE entraînée et évaluée ou non ($p < 0,001$). Par ailleurs, l'ampleur de l'amélioration est significativement plus importante quand la mémoire de travail était évaluée par rapport au contrôle inhibiteur ($p = 0,019$), c'est-à-dire que la mémoire de travail se serait plus améliorée que le contrôle inhibiteur. Un constat similaire peut être fait entre la mémoire de travail et les performances scolaires ($p = 0,004$) : la mémoire de travail se serait plus améliorée que les performances scolaires à la suite de l'entraînement. Pour les autres mesures d'évaluation, il ne ressort aucune différence significative ($p > 0,180$), c'est-à-dire que pour aucune autre compétence évaluée il est possible de dire si elle s'est plus ou moins améliorée qu'une autre.

Il y a encore le fait d'avoir entraîné aucune ($\bar{g} = 0,278$; $k = 259$), une ($\bar{g} = 0,183$; $k = 558$) ou plusieurs FE ($\bar{g} = 0,224$; $k = 263$). Les analyses montrent un effet significativement positif pour les trois niveaux de la variable ($p < 0,001$). Ainsi, les trois approches ont permis aux participants des groupes expérimentaux d'obtenir de meilleurs résultats que ceux des groupes contrôle à la suite de l'entraînement. En

revanche, les tailles d'effet obtenues pour chacun des niveaux de la variable ne sont pas significativement différentes entre elles. Entraîner aucune FE ou une seule ne semble pas faire de différence ($p = 0,263$), ainsi qu'en entraîner une ou plusieurs ($p = 0,453$) ou encore en entraîner aucune par rapport à deux ($p = 0,670$).

Une autre variable d'intérêt explorée est le type de variation dans le niveau de difficulté pendant l'entraînement. Les analyses montrent qu'une variation de type adaptatif pure ($\bar{g} = 0,174$; $k = 393$; $p < 0,001$), c'est-à-dire que le niveau de difficulté est en tout temps ajusté aux performances des participant·e·s, à la hausse ou à la baisse, ainsi qu'une variation adaptative vers à la hausse ($\bar{g} = 0,289$; $k = 93$; $p = 0,010$), c'est-à-dire que l'augmentation du niveau de difficulté se fait en fonction des progrès des participant·e·s, donnent des résultats significativement différents de zéro. Lorsque la variation du niveau de difficulté était fixée à l'avance sans tenir compte du niveau des participant·e·s ($\bar{g} = 0,144$; $k = 75$), cela donne un résultat presque significatif ($p = 0,052$). Enfin, quand il n'y avait aucune variation du niveau de difficulté ($\bar{g} = 0,427$; $k = 8$), l'analyse donne un résultat non significatif ($p = 0,190$), ce qui peut être influencé par le faible nombre d'études concernées. En somme, il est possible de dire que les groupes expérimentaux se sont plus améliorés que les groupes contrôle quand leur entraînement avait une variation de la difficulté de type adaptatif. En revanche, les tailles d'effet obtenues pour chacun des niveaux de la variable ne sont pas significativement différentes entre elles ($p > 0,247$). Concrètement, utiliser une variation adaptative pure ou seulement vers la hausse ne change pas significativement les performances des participant·e·s ($p = 0,248$).

Les variables de la fréquence et de la durée ont aussi été explorées. Dans la mesure où ce sont deux variables continues codant pour des éléments relativement similaires des études, leur colinéarité potentielle a d'abord été recherchée. Ces deux variables se sont avérées être moyennement corrélées ($r = 0,47$; $p < 0,001$). L'usage recommande d'exclure une des variables seulement si la corrélation est très forte (Harrer *et al.*,

2021). Les variables de la fréquence et de la durée ont donc pu être conservées ici. Les analyses explorant l'effet de chacune de ces variables donnent des résultats non significatifs (fréquence : $p = 0,617$; durée : $p = 0,664$). Autrement dit, ces paramètres n'ont pas eu d'impact suffisant sur les performances des participant·e·s entraîné·e·s pour les différencier des participant·e·s des groupes contrôle.

Enfin, le type de groupe contrôle a aussi fait l'objet d'analyses afin de déterminer si cela influait sur les tailles d'effet dégagées. Il ressort qu'avoir utilisé un groupe contrôle passif ($\bar{g} = 0,213$; $k = 535$), un groupe contrôle faisant une activité neutre pour les FE ($\bar{g} = 0,235$; $k = 358$), ou bien un groupe contrôle ayant un entraînement cognitif direct moins exigeant que le groupe expérimental ($\bar{g} = 0,202$; $k = 125$) a un effet significatif sur les tailles d'effet observées ($p < 0,001$; $p = 0,005$ et $p = 0,002$ respectivement). Alors que le recours à un groupe contrôle qui fait une tâche qui mobilise les FE ($\bar{g} = 0,068$; $k = 23$) ou un entraînement cognitif indirect ($\bar{g} = 0,186$; $k = 39$) n'est pas significativement lié aux tailles d'effet ($p = 0,395$ et $p = 0,602$ respectivement). Il est cependant possible que ce dernier résultat soit influencé par le petit nombre d'études entrant dans ces deux catégories. Par ailleurs, les différences entre les groupes ne sont pas significatives ($p > 0,392$). Il est donc impossible de dire si avoir un groupe contrôle passif augmente les chances de trouver des effets positifs aux interventions par rapport à avoir un groupe contrôle neutre ou faisant un entraînement cognitif direct par exemple.

4.2 Interactions entre certaines variables d'intérêt

La première interaction à explorer est entre l'âge représenté par la variable « école » et le type d'entraînement. Réaliser des analyses de variance nécessite de vérifier que les prémisses sont vérifiées pour chacune des analyses : indépendance des mesures, normalité de la distribution des résiduels et homogénéité des variances. Les données

ne sont pas indépendantes, d'où le choix de l'ANOVA nichée. Malgré tout un test de Durbin Watson visant à évaluer le degré de corrélation des mesures a été réalisé et montre que les données peuvent être considérées comme indépendantes puisque l'indice statistique du test est compris entre 1,5 et 2,5 (Field, 2009; $r = 0,060$; $DW\ statistic = 1,880$; $p < 0,001$). L'examen de l'histogramme de répartition des résiduels suggère une distribution normale. Enfin, le test de Levene réalisé est non significatif ($p = 0,096$), ce qui suggère que les variances entre les groupes sont homogènes. Les prémisses de l'ANOVA sont ainsi respectées. L'ANOVA en elle-même fait ressortir une interaction significative et d'effet petit entre l'âge et le type d'entraînement ($F(3, 950) = 6,357$; $p < 0,001$; $\eta^2_{partiel} = 0,02$). Les tests post-hoc ont été réalisés sous la forme de comparaisons planifiées correspondant aux comparaisons d'intérêt selon l'hypothèse : un type d'intervention donne-t-il plus d'effet pour un même groupe d'âge? Cela donne sept comparaisons. Le seuil de significativité a été ajusté en conséquence selon la méthode conservatrice de Bonferroni à $\alpha = 0,007$. La seule interaction significative avec ce seuil de significativité réduit est au niveau secondaire ($p = 0,003$). L'entraînement cognitif indirect ($\bar{g} = 0,453$) donne une taille d'effet moyenne significativement supérieure à l'entraînement direct cognitif ($\bar{g} = 0,110$) comme on peut le voir dans la Figure 4.1. Il faut noter qu'au niveau de la maternelle, la différence entre l'entraînement direct cognitif ($\bar{g} = 0,264$) et l'intervention sur l'environnement ($\bar{g} = 0,125$) approche de la significativité ($p = 0,016$). La même chose est trouvée au niveau primaire ($\bar{g} = 0,197$ et $\bar{g} = 0,351$ respectivement; $p = 0,037$). Cela suggère qu'il existe peut-être une différence dans l'impact des interventions en maternelle en faveur de l'entraînement cognitif et au primaire en faveur de l'intervention sur l'environnement que les données actuelles ne sont pas parvenues à faire ressortir considérant que les interventions sur l'environnement sont moins nombreuses.

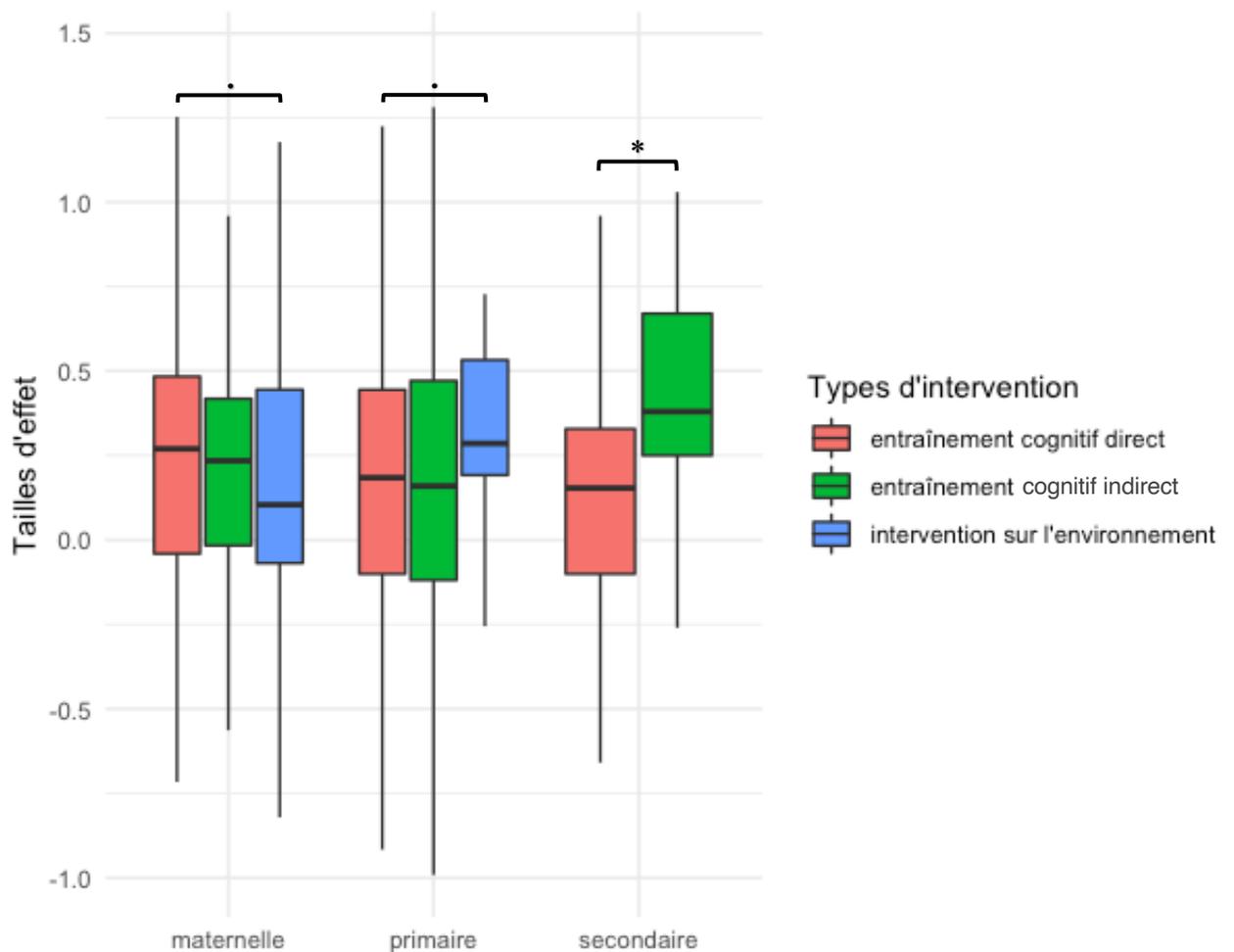


Figure 4.1. Répartition des tailles d'effet g pour chaque type d'entraînement en fonction de la tranche d'âge. * = comparaison significative; · = comparaisons marginalement significatives.

La seconde interaction d'intérêt d'après les hypothèses de recherche concerne la compétence évaluée et la tranche d'âge. Les prémisses de l'ANOVA sont respectées (indépendance des données : $r = -0,027$; $DW\ statistic = 2,050$; $p = 0,004$; distribution

normale des résiduels; homogénéité des variances : $p = 0,096$). L'analyse fait ressortir une interaction significative et de faible ampleur entre la tranche d'âge et la compétence évaluée ($F(10, 693) = 3,276$; $p < 0,001$; $\eta^2_{\text{partiel}} = 0,05$). Comme précédemment, les tests post-hoc ont été réalisés sous la forme de comparaisons planifiées correspondants aux comparaisons d'intérêt selon les hypothèses de recherche, certaines comparaisons ne présentant aucun sens. Ainsi 45 comparaisons ont été réalisées. Le seuil de significativité a été ajusté en conséquence selon la méthode de Bonferroni conservatrice à $\alpha = 0,001$. Plusieurs interactions significatives sont ressorties au niveau primaire :

- la mémoire de travail ($\bar{g} = 0,326$; $k = 151$) s'est plus améliorée que le contrôle inhibiteur ($\bar{g} = 0,140$; $k = 168$; $p < 0,001$);
- la mémoire de travail ($\bar{g} = 0,326$; $k = 151$) s'est plus améliorée que la flexibilité cognitive ($\bar{g} = 0,105$; $k = 90$; $p < 0,001$);
- le comportement ($\bar{g} = 0,611$; $k = 19$) s'est plus amélioré que le contrôle inhibiteur ($\bar{g} = 0,140$; $k = 168$; $p < 0,001$);
- le comportement ($\bar{g} = 0,611$; $k = 19$) s'est plus amélioré que flexibilité cognitive ($\bar{g} = 0,105$; $k = 90$; $p < 0,001$).

La figure 4.2 permet de visualiser ces différences. Cela suggère qu'au primaire la mémoire de travail et le comportement se sont plus améliorés que les autres types de mesure. Selon la figure 4.2, il semble aussi que pour le niveau secondaire certaines différences soient prononcées, bien qu'elles ne ressortent pas comme étant significatives dans les analyses. C'est le cas de la différence entre la mesure de la mémoire de travail ($\bar{g} = 0,650$; $k = 5$) et celle du contrôle inhibiteur ($\bar{g} = 0,171$; $k = 6$; $p = 0,033$), ainsi qu'entre la mesure de la mémoire de travail ($\bar{g} = 0,650$; $k = 5$) et celle des performances scolaires ($\bar{g} = 0,129$; $k = 9$; $p = 0,029$). La cause de la non significativité des différences réside peut-être dans le particulièrement faible nombre d'études pour chaque type de mesure. Le même constat peut être fait pour des

différences au niveau primaire entre la mémoire de travail ($\bar{g} = 0,326; k = 151$) et le comportement ($\bar{g} = 0,611; k = 19; p = 0,023$) ainsi qu'avec les performances scolaires ($\bar{g} = 0,187; k = 102; p = 0,012$), entre le comportement ($\bar{g} = 0,611; k = 19$) et les FE supérieures ($\bar{g} = 0,242; k = 36; p = 0,006$) ainsi qu'avec les performances scolaires ($\bar{g} = 0,187; k = 102; p = 0,013$). Et enfin au niveau de la maternelle, bien que moins évident visuellement sur la Figure 4.2, certaines différences non significatives avec le seuil corrigé, méritent d'être rapportées pour les tendances qu'elles suggèrent : entre la mémoire de travail ($\bar{g} = 0,294; k = 87$) et le contrôle inhibiteur ($\bar{g} = 0,166; k = 108; p = 0,035$), ainsi qu'avec les performances scolaires ($\bar{g} = 0,145; k = 67; p = 0,016$); puis entre la flexibilité cognitive ($\bar{g} = 0,357; k = 31$) et le contrôle inhibiteur ($\bar{g} = 0,166; k = 108; p = 0,049$), ainsi qu'avec les performances scolaires ($\bar{g} = 0,145; k = 67; p = 0,030$).

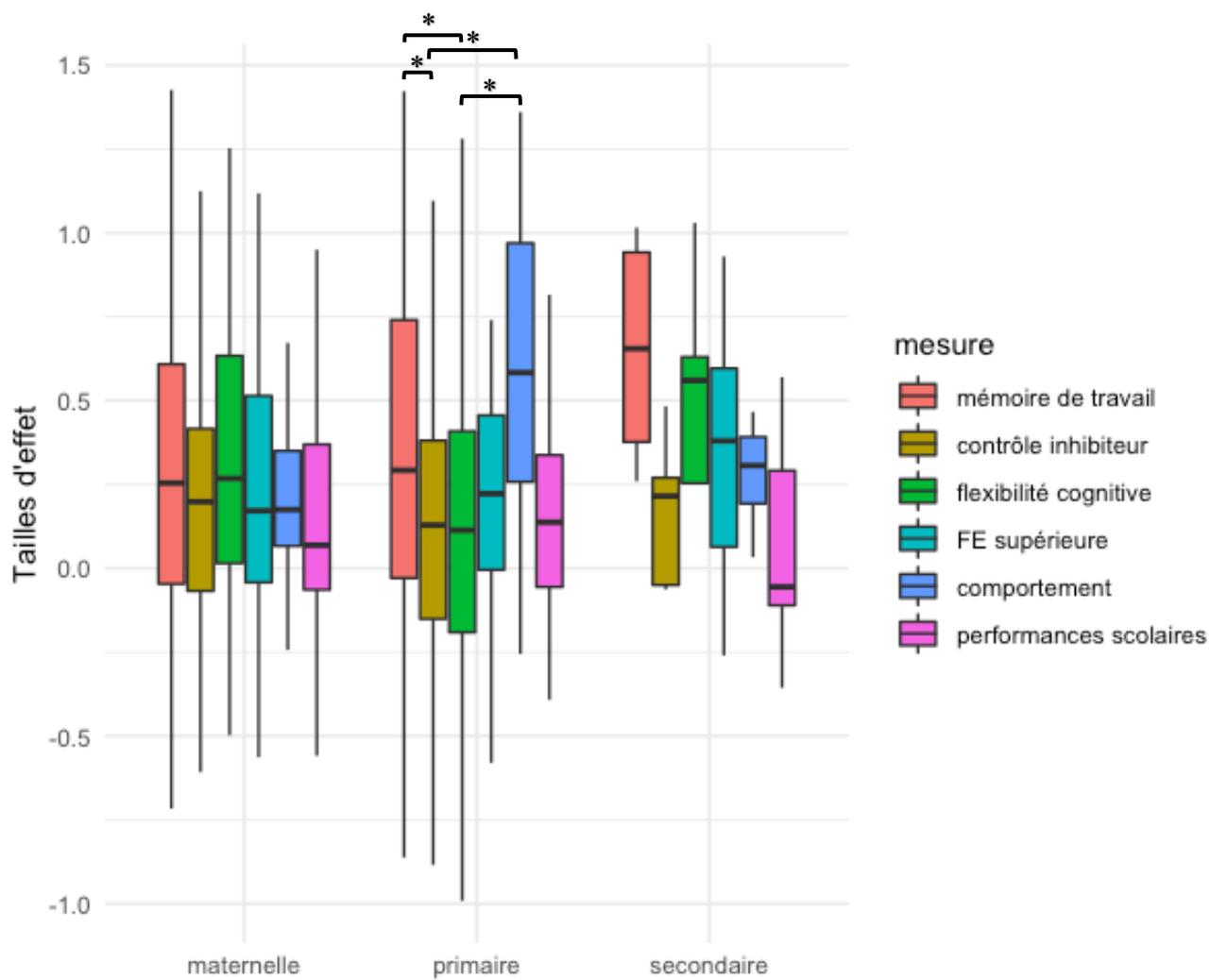


Figure 4.2. Répartition des tailles d'effet g pour chaque type de compétence évaluée en fonction de la tranche d'âge. * : comparaisons significatives.

4.3 Transfert

4.3.1 Reproduction de la dichotomie transfert proche – transfert éloigné

Afin de s'assurer que nos données et donc nos analyses étaient représentatives des connaissances sur le transfert dans le cadre des entraînements cognitifs, un score visant à reproduire la distinction transfert proche – transfert éloigné a été calculé. Il repose sur le score de transfert de contenu uniquement, car dans les autres méta-analyses seul le contenu des tâches est considéré pour déterminer le niveau de transfert (p. ex., Kassai *et al.*, 2019). Les quartiles extrêmes du transfert de contenu, donc ses niveaux 1 et 4, ont été retenus pour former les niveaux transfert proche et transfert éloigné du score de contenu extrême. Le modèle à effets hiérarchiques corrélés a été appliqué à ce nouveau score. Il en ressort que les deux groupes ainsi constitués sont significativement différents ($p = 0,031$). Le groupe du transfert proche a une taille d'effet moyenne de 0,255 et le groupe transfert éloigné de 0,213. Cela signifie que dans le cas du transfert éloigné l'amélioration des performances des participants des groupes expérimentaux à la suite des entraînements est significativement moins grande que dans le cas du transfert proche. Ce qui reproduit les résultats les plus fréquents concernant le transfert dans le cadre des entraînements cognitifs.

4.3.2 Portrait du transfert variable par variable

Les données extraites des études touchant au transfert ont été codées dans 11 variables. Pour une des variables, le contexte physique, il y avait plus de 50% de données manquantes. En conséquence, cette variable a été abandonnée. Pour les 10 variables restantes, le modèle à effets hiérarchiques corrélés a été appliqué. Dans la mesure où ce traitement du transfert est exploratoire, le but de ces analyses était de voir dans un premier temps si l'existence individuelle de chacune de ces variables était légitime.

Tableau 4.2.

Synthèse des résultats d'analyses pour les variables du transfert

Variables	Niveaux	Nombre de mesures	g moyens	Significativité	Différence avec le 1er niveau
Variables liées au contenu transféré					
Fonction exécutive	identique	432	0,244 *	$p < 0,001$	
	différente	303	0,197 *	$p < 0,001$	$p = 0,174$
Processus cognitif	identique	369	0,240 *	$p < 0,001$	
	différent	502	0,190 *	$p < 0,001$	$p = 0,102$
Demande en mémoire	exécution	43	0,172 *	$p = 0,015$	
	reconnaisances	82	0,334 *	$p = 0,003$	$p = 0,414$
	rappel	824	0,206 *	$p < 0,001$	$p = 0,157$
Variables liées au contexte du transfert					
Environnement social	degré 1	271	0,283 *	$p < 0,001$	
	degré 2	329	0,189 *	$p < 0,001$	$p = 0,450$
	degré 3	188	0,165 *	$p = 0,009$	$p = 0,127$
	degré 4	11	0,387	$p = 0,160$	$p = 0,538$
Contexte social	degré 1	362	0,185 *	$p < 0,001$	
	degré 2	151	0,223 *	$p < 0,001$	$p = 0,800$
	degré 3	84	0,219 *	$p = 0,016$	$p = 0,581$
	degré 4	77	0,136	$p = 0,360$	$p = 0,099$
Modalité de la tâche	identique	390	0,220 *	$p < 0,001$	
	différente	393	0,214 *	$p < 0,001$	$p = 0,200$
Modalité de la réponse	identique	381	0,201 *	$p < 0,001$	
	différente	376	0,217 *	$p < 0,001$	$p = 0,692$
Contexte temporel	degré 1	281	0,238	$p = 0,163$	
	degré 2	76	0,199 *	$p < 0,001$	$p = 0,184$
	degré 3	232	0,233 *	$p < 0,001$	$p = 0,429$
	degré 4	46	0,151 *	$p = 0,031$	$p = 0,857$
	degré 5	28	0,351	$p = 0,759$	$p = 0,951$
Contexte fonctionnel	degré 1	55	0,378 *	$p = 0,004$	
	degré 2	991	0,208 *	$p < 0,001$	$p = 0,145$
Connaissances	degré 1	518	0,200 *	$p < 0,001$	
	degré 2	164	0,253 *	$p < 0,001$	$p = 0,781$
	degré 3	93	0,221 *	$p = 0,018$	$p = 0,127$
	degré 4	11	0,108	$p = 0,636$	$p = 0,017$
	degré 5	65	0,240 *	$p = 0,048$	$p = 0,468$

Note. * = tailles d'effet significatives

Le tableau 4.2 permet de voir que la plupart des niveaux des 10 variables présentées produisent des tailles d'effet moyennes significativement différentes de zéro. Autrement dit, les participant·e·s des groupes expérimentaux se sont plus améliorés que ceux des groupes contrôle pour les différents niveaux concernés des 10 variables, comme dans le cas où la FE évaluée était différente de celle entraînée ($p < 0,001$). Pour les comparaisons entre les niveaux au sein d'une même variable, il a été choisi de comparer chaque niveau avec un niveau de référence : le premier niveau de chaque variable. Cela repose sur le fait que ces niveaux ne sont pas des catégories distinctes au sein d'une même variable. Ils représentent un ordonnancement croissant, les rapprochant d'une variable continue. Dans cette situation, dans le cadre d'une régression, domaine dont relève le modèle à effets hiérarchiques corrélés utilisé, il est légitime de considérer le premier niveau comme niveau de référence (Harrer *et al.*, 2021). Seule la variable « demande en mémoire » a fait l'objet d'un traitement différent, dans la mesure où ses niveaux sont des catégories. Dans ce cas, tous les niveaux ont été comparés deux à deux. Dans le cadre des comparaisons de niveaux, il ressort que toutes les autres comparaisons sont non significatives à l'exception du degré 4 de la variable « connaissances ». Dans la mesure où la taille d'effet pour le degré 4 de la variable « connaissances » n'est elle-même pas significative, la significativité détectée dans sa comparaison avec le degré 1 perd son sens et devient un résultat non interprétable. Concrètement, cela signifie que les tailles d'effet propres à chaque niveau pour une variable donnée ne sont pas significativement différentes du niveau, et donc qu'il est impossible de dire si un niveau de transfert comparé à un autre a donné plus d'effet ou non au sein d'une variable. Par exemple, il est impossible de savoir si demander de la reconnaissance lors de l'évaluation ($\bar{g} = 0,334$) a significativement un impact plus grand sur les performances que demander du rappel ($\bar{g} = 0,206$).

4.3.3 Portrait du transfert synthétisé

4.3.3.1 Scores de transfert en variable continue

Les analyses de régression du modèle hiérarchique corrélé entre la taille d'effet et le score de transfert de contenu en variable continue est significative ($p = 0,015$) : plus on augmente ce score, plus la taille d'effet diminue, ce qui va dans le même sens que l'analyse servant à reproduire la dichotomie transfert proche-transfert éloigné. La même analyse avec le score de transfert de contexte n'est pas significative ($p = 0,096$), signifiant que pour le transfert de contexte, aucun impact de l'augmentation du transfert ne ressort sur les tailles d'effet. Cela ne ressort pas non plus lorsque le score de transfert global est utilisé ($p = 0,253$), c'est-à-dire que peu importe l'ampleur du transfert global, aucun lien ne peut être fait avec les tailles d'effet.

4.3.3.2 Scores de transfert en variable catégorielle

Les analyses avec les quatre niveaux de scores de transfert, pour chacun des types de ces scores, global, de contenu et de contexte, donnent une seule comparaison significative : entre le niveau 1 et le niveau 2 du score global de transfert, avec le niveau 2 ($\bar{g} = 0,338$) supérieur au niveau 1 ($\bar{g} = 0,215$; $p = 0,015$). Cela signifie que lorsque le transfert global était de niveau 2, donc moyen, les performances des participant·e·s ont été supérieures à quand le transfert global était de niveau 1, c'est-à-dire aucun transfert ou un transfert très limité.

4.3.3.3 Interactions transfert - âge

Le calcul de scores de transfert a permis par la suite de réaliser des ANOVA nichées afin de voir si globalement le transfert interagissait avec l'âge des participant·e·s pour expliquer la variation dans les tailles d'effet observées.

Tout d'abord, avec le score de transfert global, les prémisses de l'ANOVA sont respectées, mais l'analyse n'est pas significative ($F(4; 439) = 1,320; p = 0,262$). Le même constat doit être posé pour le score de transfert de contenu ($F(5; 702) = 1,120; p = 0,347$) et le transfert de contexte ($F(6; 593) = 1,590; p = 0,147$). Autrement dit, aucune interaction entre la tranche d'âge et le niveau de transfert pour chacun des scores de transfert n'a été détectée. L'âge ne semble pas être lié au niveau de transfert atteint.

CHAPITRE V

DISCUSSION

Dans ce chapitre sont discutés les résultats. Tout d'abord, la signification et l'impact de la reproduction de la dichotomie transfert proche-transfert éloigné. Ensuite, les résultats qui touchent aux potentielles variables modératrices de l'efficacité des entraînements (l'âge, le type d'entraînement et les caractéristiques de l'entraînement). Ainsi certaines variables, selon les résultats obtenus ici, semblent effectivement liées à l'efficacité. Par la suite sont discutés les résultats concernant la FE qui semble bénéficier le plus des entraînements, toujours dans l'optique de déterminer quel entraînement serait le plus prometteur. Ces dernières sections amènent à s'intéresser aux résultats des interactions entre l'âge et les autres variables mentionnées, afin d'affiner le portrait de l'efficacité des entraînements cognitifs en fonction de la population ciblée. Enfin, les résultats touchant au transfert sont présentés, d'abord les résultats liés aux facteurs du transfert, puis le constat de la difficulté à dégager des niveaux de transfert.

5.1 Reproduction de la distinction transfert proche-transfert éloigné

Il était important de vérifier que les données collectées étaient représentatives des études d'entraînement cognitif. Le moyen choisi pour ce faire a été de tenter de reproduire la dichotomie transfert proche-transfert éloigné. Les analyses montrent que les données collectées permettent de reproduire la dichotomie habituelle, utilisée dans les méta-analyses s'intéressant aux entraînements cognitifs (p. ex., Melby-Lervåg et Hulme, 2013). On observe une différence dans le niveau moyen des performances selon la tâche d'évaluation en faveur du transfert proche. Autrement dit, les performances

sont globalement meilleures quand les tâches d'évaluation demandent du transfert proche, c'est-à-dire quand les tâches d'entraînement et d'évaluation se ressemblent. Ce constat était attendu et avait fait l'objet de l'hypothèse selon laquelle plus le transfert demandé serait important moins ledit transfert serait obtenu, dans la mesure où il a été depuis longtemps observé par les études scientifiques que les performances étaient meilleures dans le cadre du transfert proche (p. ex., Sala et Gobet, 2017). Pour certains auteurs, cela s'explique par la facilitation lors du rappel en mémoire générée par la similitude entre les tâches dans leur forme (Bracke, 1998) ou leur contenu (Day et Goldstone, 2012; Taktek, 2017). Cependant, le point important ici est d'être parvenu à reproduire cette dichotomie transfert proche-transfert éloigné, plus que les causes de son existence même. Cela prouve que les données collectées ont une composition et une variation semblables aux données collectées dans le cadre des autres méta-analyses. Ainsi, la validité des données rassemblées pour le travail présenté ici, et donc les analyses réalisées avec ces données, en est renforcée.

5.2 Variables modératrices potentielles de l'efficacité des entraînements cognitifs

Parmi les buts de la recherche présentée ici, il y a l'identification de variables modératrices liées à l'efficacité des entraînements cognitifs. Pour ce faire des analyses avec plusieurs variables sélectionnées en amont ont été réalisées : l'âge, le type d'entraînement et les caractéristiques de l'entraînement.

5.2.1 Âge

Une des hypothèses de recherche était que les performances des personnes entraînées varieraient selon leur âge dans la mesure où pendant toute la scolarité le cerveau connaît différentes phases de développement. Les analyses permettent d'observer que les entraînements en général ont eu un effet significativement positif sur les performances des élèves de maternelle et de primaire, mais pas de secondaire. Cela pourrait suggérer

que les entraînements dans leur ensemble fonctionnent mieux avec des élèves plus jeunes. Cependant, le faible nombre d'études avec des élèves de niveau secondaire comparativement aux niveaux maternelle et primaire pourrait aussi expliquer l'absence de significativité des résultats pour les élèves de niveau secondaire. Par ailleurs, aucune différence dans le niveau de performance n'a été trouvée entre les élèves de maternelle et de primaire. Autrement dit, l'impact des entraînements cognitifs semble être le même que l'on entraîne des enfants en maternelle ou en primaire, malgré le fait que leur cerveau n'en soit pas au même stade de développement. Cela amène des paradoxes avec l'hypothèse neurodéveloppementale rappelée ci-dessus. L'explication pourrait être d'ordre méthodologique. L'âge a été considéré sous la forme de groupes correspondant aux trois étapes de la scolarité obligatoire : maternelle, primaire et secondaire. En conséquence, il peut y avoir des chevauchements entre les groupes si un enfant est en avance ou en retard dans sa scolarité. Cela suppose aussi que les groupes sont inégaux dans le nombre d'années qu'ils comprennent. Le niveau maternelle comprend au plus 3 ans selon les pays, le niveau primaire 6 ans et le niveau secondaire 5 ans. Considérant que le fonctionnement cognitif connaît un développement important au début de la scolarité (Diamond, 2012), peut-être que rassembler tous les enfants de primaire dans un seul groupe d'âge a empêché de dégager un lien entre l'âge et les effets de l'entraînement en fonction du stade de développement cérébral et cognitif. Une autre explication, enfin, pourrait résider dans le potentiel d'amélioration qu'ont les enfants en maternelle et en primaire par rapport aux adolescents. Concrètement, plus les enfants sont jeunes, plus leurs FE doivent encore se développer et vont donc s'améliorer. En conséquence, plus un enfant est jeune, plus il est loin du développement maximum possible de ses FE. Cela suggère que, au cours de l'adolescence, le potentiel d'amélioration serait possiblement moindre (Baum *et al.*, 2017), pouvant possiblement expliquer la non-détection d'un effet chez les élèves du secondaire.

En somme, l'effet de l'âge ne peut être affirmé dans le travail présenté ici, mais il semble prématuré de conclure qu'il n'existe pas. Des analyses plus fines seraient nécessaires pour mieux comprendre les résultats obtenus.

5.2.2 Type d'entraînement

De façon exploratoire, l'impact différentiel des types d'entraînements était aussi recherché. Il ressort que les entraînements cognitifs directs et indirects amènent des changements significatifs dans les performances, à la différence des interventions sur l'environnement. Cependant, il est à nouveau important de noter ici le faible nombre d'études qui utilisaient des interventions sur l'environnement, à la différence des deux autres types d'entraînements. En conséquence, soit les interventions sur l'environnement n'ont pas prouvé ici leur efficacité, soit il y a un manque de puissance statistique pour détecter leur efficacité. Concernant les entraînements ayant des effets significativement positifs, aucune différence dans l'ampleur de cet effet n'a été trouvée. Cela signifie, d'après les données recueillies, que peu importe la forme de l'entraînement, l'impact positif sera similaire pour des entraînements ponctuels. Autrement dit, cibler les FE avec des tâches simples et répétitives ou élaborer un programme d'éducation physique orienté vers l'exigence cognitive a autant permis d'améliorer les FE des participant·e·s. En poussant un peu plus loin l'argument, il est possible de dire à ce stade que, tant que l'entraînement est une intervention ciblée, dont l'application est ponctuelle, et qu'il demande un effort cognitif à l'apprenant, cantonné aux moments de l'intervention, les FE en bénéficieront.

Il est délicat d'interpréter ce résultat dans la mesure où le faible nombre d'études utilisant des interventions de type environnement pourrait être la raison de leur absence d'effet par rapport aux entraînements cognitifs (directs et indirects). Cependant, s'il fallait chercher une explication, peut-être l'espacement pourrait-il être un bon candidat, dans la mesure où, pour les entraînements cognitifs directs comme indirects, il s'agit

d'interventions ponctuelles différentes du travail quotidien fourni par ailleurs amenant un effet d'espacement entre les séances d'entraînement. Alors que dans les interventions de type environnement, c'est l'environnement de travail quotidien qui cible le développement des FE, limitant la possibilité d'un espacement. En termes neurocognitifs, l'espacement est le fait de travailler de façon répétée, mais espacée dans le temps, un contenu d'apprentissage quelconque. Les recherches sur le sujet montrent que l'apprentissage est amélioré quand l'espacement est mis en place (Kornell, 2009). Autrement dit, en contexte scolaire, les élèves qui s'exercent un peu sur un contenu sur plusieurs jours ou semaines ont de meilleures performances académiques que ceux qui condensent leur apprentissage sur un temps restreint. Cela s'explique par plusieurs phénomènes neuronaux. Tout d'abord, la réactivation des connexions neuronales utilisées pendant la journée lors des phases de sommeil qui contribue au renforcement desdites connexions et donc des apprentissages qu'elles sous-tendent (Antony *et al.*, 2012; Rasch et Born, 2013). Ensuite, la contrainte de réactiver les connexions liées à l'apprentissage à chaque fois qu'il doit être utilisé, qui participe aussi à renforcer les connexions et donc l'apprentissage (Bradley *et al.*, 2015; Hebb, 2002). Enfin, espacer les activations permet de maintenir une activation cérébrale propice à l'apprentissage, c'est-à-dire une activation cérébrale typique de l'attention et la concentration, lors de chaque exposition au contenu à apprendre, par rapport à voir le contenu de façon groupée qui mène à une baisse de l'activité des régions cérébrales impliquées dans l'apprentissage, à un désengagement de l'attention pour le contenu à apprendre (Bradley *et al.*, 2015; Callan et Schweighofer, 2010). Ainsi, il est possible de remarquer que les interventions ponctuelles, à la différence des interventions implantées dans le quotidien des élèves, adoptent un modèle avec espacement, ce qui a possiblement contribué à leur effet positif.

5.2.3 Caractéristiques des entraînements

Un des questionnements dans ce projet concernait les caractéristiques concrètes d'un entraînement cognitif efficace. De façon exploratoire, plusieurs caractéristiques des entraînements ont été prises en compte dans les analyses. Il s'agit du nombre de FE entraînées, du type de variation du niveau de difficulté, de la fréquence et de la durée de l'entraînement. Globalement, les analyses ne permettent pas d'aboutir à une caractérisation claire de la forme d'un entraînement cognitif efficace. Le nombre de FE entraînées, tout comme la fréquence ou la durée ne semblent pas avoir d'impact sur les performances mesurées après l'entraînement. Cela signifie donc que les FE s'amélioraient quand aucune FE n'était directement ciblée par l'entraînement, comme dans le cas d'une activité sportive, ce qui est en accord avec la conclusion sur le type d'entraînement, ou quand l'entraînement ciblait plusieurs FE en même temps. Concernant la durée et la fréquence, l'absence de lien avec les performances après l'entraînement signifierait que s'entraîner une fois permettrait de s'améliorer de façon similaire à s'entraîner plusieurs fois. Une interprétation possible serait que l'amélioration provoquée par l'entraînement se manifesterait très rapidement. Par la suite, elles seraient moins importantes, expliquant potentiellement une absence d'effet de la durée. Il est aussi possible que ce résultat soit à lier à celui sur le type d'entraînement. Les interventions qui ont donné des résultats significativement positifs sont celles qui étaient ponctuelles, donc dont les répétitions étaient limitées, et directes. Il serait pertinent de croiser ces deux éléments d'information pour vérifier que les interventions directes à peu de répétitions sont bien celles qui expliquent l'absence d'effet de la durée et de la fréquence dans la forme de l'entraînement. Le codage utilisé dans cette recherche ne permettait pas de le faire. Les résultats actuels permettent cependant de dire qu'il semble plausible que l'impact positif des entraînements soit observable dès le début, c'est-à-dire nonobstant la durée totale de l'intervention, à tout le moins quand on réalise l'évaluation rapidement après la session d'entraînement comme c'est le cas pour la très grande majorité des études d'entraînement cognitif. Une

autre façon de le confirmer serait de comparer des interventions brèves et longues avec des temps de mesure variés, c'est-à-dire proches et éloignés de la dernière session d'entraînement.

En ce qui concerne le type de variation du niveau de difficulté lors de l'entraînement, l'hypothèse de recherche posait qu'une variation de type adaptatif mènerait à une plus grande amélioration des performances que les autres types de variation du niveau de difficulté. Les résultats des analyses vont dans ce sens, c'est-à-dire qu'un niveau de difficulté qui s'adapte au niveau des participant·e·s permet d'obtenir de meilleures performances par rapport à une absence de variation dans la difficulté ou une augmentation de la difficulté qui ne tient pas compte du niveau des participant·e·s. Ce résultat est d'ailleurs en accord avec les études antérieures (Bergman Nutley *et al.* 2011, Grützmann *et al.*, 2021; Holmes *et al.* 2009, Klingberg *et al.* 2005). Un niveau de difficulté adaptatif signifie un défi réaliste permanent, ce qui maintient l'intérêt pour la tâche et donc garde l'attention sur la tâche, tout en repoussant toujours un peu les limites personnelles permettant l'amélioration (Diamond, 2014).

Bien que cela ne soit pas une caractéristique du type d'entraînement, mais plutôt du protocole expérimental, il est nécessaire de revenir sur les résultats concernant le type de groupe contrôle. L'hypothèse était que le recours à un groupe contrôle passif donnerait des résultats plus élevés. Pour résumer, les études qui ont utilisé un groupe contrôle passif, ou actif faisant une tâche cognitivement peu exigeante ou une version très allégée de l'entraînement cognitif direct offert au groupe expérimental obtiennent en moyenne plus d'améliorations significatives des performances des participants du groupe expérimental, en comparaison des études dont le groupe contrôle faisait une tâche cognitivement exigeante ou un entraînement cognitif indirect. Autrement dit, certains protocoles expérimentaux semblent favoriser l'obtention des résultats attendus, sans que cela soit lié aux tâches réalisées par les participants des groupes expérimentaux. Cela constitue un biais dans les résultats, qui est en accord avec les

conclusions des méta-analyses antérieures, comme cela a été soulevé plus tôt (Sala et Gobet, 2017).

Pour résumer, les enfants de maternelle et de primaire pourraient être ceux bénéficiant le plus des entraînements cognitifs. Parallèlement, les entraînements cognitifs directs et indirects semblent être les types d'entraînement donnant des résultats significatifs. Cependant, dans les deux cas, un nombre d'études très variable entre les catégories pourraient biaiser ces conclusions. Concernant les caractéristiques des entraînements, peu d'éléments significatifs ressortent, rendant difficile de dresser le portrait d'un entraînement efficace. La seule variable semblant devoir être introduite dans les entraînements avec un certain degré de certitude est le caractère adaptatif du niveau de difficulté. Autrement dit, élaborer des entraînements stimulants mais non décourageants.

5.3 FE et compétences s'améliorant le plus

Bien qu'aucune étude antérieure ne permît d'anticiper qu'une FE s'améliorerait plus qu'une autre à la suite d'un entraînement, cela a été exploré dans les analyses afin d'avoir un début de réponse à cette question. Les résultats montrent que la mémoire de travail est la FE qui a le plus bénéficié des entraînements. Concrètement, les évaluations de la mémoire de travail après intervention sont significativement meilleures pour les groupes expérimentaux par rapport aux groupes contrôle et par rapport aux évaluations des autres FE ou des performances scolaires. Dans ce résultat, aucune différence n'est faite en fonction de la cible de l'entraînement ou de l'âge des participant·e·s. Autrement dit, la mémoire de travail semble la FE qui s'améliore le plus en général, et ce même si elle n'est pas spécifiquement entraînée.

Une explication pourrait être recherchée du côté de l'utilisation de la mémoire de travail dans toute tâche : absolument tout comportement orienté vers un but mobilise la mémoire de travail (Diamond, 2014). Il ne s'agit pas seulement des comportements liés au travail, tout comportement de la vie courante nécessite la mémoire de travail, comme tenir des propos cohérents, comprendre les paroles d'un interlocuteur, lire, regarder la télévision, jouer, préparer un repas, etc. Cela s'explique par le besoin de se souvenir des éléments antérieurs ainsi que de règles ou principes, de retenir ce qui se passe sur le moment et d'anticiper la suite. Ceci est le rôle de la mémoire de travail : garder présent à l'esprit, même si cela peut être inconscient, des éléments passés nécessaires, faire le lien avec le présent et aller chercher en mémoire ce qui pourra venir ensuite. Ainsi, lors d'une intervention quelconque, mais qui se caractérise par une tâche organisée, même aussi simple que d'appuyer le plus vite possible sur une touche quand l'enfant voit certaines lettres apparaître à l'écran et se retenir d'appuyer pour d'autres, la mémoire de travail est mobilisée, car il faut au moins se souvenir des règles de la tâche. En conséquence, peu importe la cible de l'entraînement, la mémoire de travail aura travaillé. C'est peut-être une explication à son amélioration plus importante que les autres FE. De façon complémentaire, il semble pertinent de soulever que les autres FE, c'est-à-dire le contrôle inhibiteur et la flexibilité cognitive, sont moins fréquemment sollicitées. Concernant le contrôle inhibiteur, bien qu'il soit tout aussi central au fonctionnement cognitif, son rôle de contrôle des interférences internes ou externes le mène à agir en soutien à la mémoire de travail (Diamond, 2013). Quant à la flexibilité cognitive, elle aussi fondamentale dans le fonctionnement exécutif, elle est moins souvent mobilisée. Un contexte de désengagement d'une tâche ou d'une pensée est nécessaire. Peut-être cela contribue-t-il à mener la mémoire de travail à plus bénéficier des entraînements.

Enfin, il est intéressant de noter que cette amélioration de la mémoire de travail, plus que des autres FE, pourrait indiquer que la mémoire de travail serait potentiellement une FE plus centrale que les autres chez les enfants et les adolescents. Ainsi, le modèle

traditionnel où les trois FE ont une place égale (Diamond, 2013) pourrait être ajusté sur la base des résultats obtenus et accorder une place plus importante à la mémoire de travail chez les enfants et adolescents. Le modèle de Friedman et ses collaborateurs (Friedman et Miyake, 2017) semble plus en accord avec les résultats. Il pose qu'il y aurait un facteur unitaire commun complété d'un facteur spécifique pour certains aspects la mémoire de travail et un autre pour certains aspects de la flexibilité cognitive. En observant une amélioration de la mémoire de travail, qu'elle ait été entraînée ou non, cela mène à proposer que le facteur unitaire commun relèverait, au moins en partie, de la mémoire de travail. Parallèlement, cela soulève une interrogation concernant le contrôle inhibiteur dans ce modèle d'organisation des FE. Selon les différentes interprétations faites du modèle de Friedman, le contrôle inhibiteur serait inclus dans le facteur unitaire commun ou bien serait le facteur unitaire commun lui-même. Les résultats obtenus ici vont à l'encontre au moins de cette dernière interprétation : si le contrôle inhibiteur était le facteur unitaire commun du fonctionnement exécutif, il est probable que c'est lui qui se serait le plus amélioré. Et pour l'interprétation qui considère que le contrôle inhibiteur est juste inclus dans le facteur unitaire commun, il demeure surprenant qu'il ne se soit pas amélioré dans la même proportion que la mémoire de travail. Cela encourage à s'intéresser aux recherches qui proposent que le contrôle inhibiteur ne serait pas tant une FE, qu'un processus de tri des informations, un mécanisme neuronal local d'inhibition de l'information utilisé par une FE apparentée à la mémoire de travail (Friedman et Miyake, 2004; Hampshire et Sharp, 2015; Munakata *et al.*, 2011). Il n'y aurait alors pas de fonction inhibitrice générale. Cette interprétation se retrouve dans le modèle d'organisation des FE de Friedman et ses collaborateurs (2017).

Par ailleurs, les résultats présentés dans ce travail indiquent que toutes les cibles d'évaluation se sont améliorées à la suite de l'entraînement, c'est-à-dire les FE, le comportement et les performances scolaires. Autrement dit, et comme mentionné plus tôt, la mémoire de travail s'est juste significativement plus améliorée que les autres

cibles. Cela signifie que les autres FE, le comportement et les performances scolaires se sont tout de même améliorés chez les groupes expérimentaux après les entraînements. Bien que l'amélioration soit moins substantielle que celle de la mémoire de travail, il demeure important de le souligner. Cette moindre amélioration en fait des cibles d'entraînement probablement moins pertinentes, mais cela n'exclut pas un potentiel d'amélioration intéressant selon les besoins identifiés dans une population.

Il faut aussi rappeler que les méta-analyses antérieures tendaient à trouver que, à la suite d'un entraînement cognitif, chaque FE pouvait s'améliorer si elle avait été ciblée, et lorsque la cible était une FE différente de celle évaluée, alors aucune amélioration n'était relevée (p. ex., Sala et Gobet, 2017). Les résultats présentés ici ne vont pas tout à fait dans le même sens, puisque chaque FE semble avoir profité des entraînements même lorsqu'elle n'était pas ciblée. L'explication de cette divergence partielle réside peut-être dans la méthode d'analyse. Le recours au modèle hiérarchique corrélé, bien que reposant sur la méthode encouragée de la méta-régression pour faire des méta-analyses à multiples variables, est peu fréquent. Aucune méta-analyse sur l'entraînement cognitif l'utilisant n'a été trouvée. Chaque méthode d'analyse et technique statistiques ayant un impact sur les résultats obtenus, il est possible que ce soit la source de la divergence de résultats. Cela indique qu'il serait nécessaire de réaliser d'autres méta-analyses avec cette méthode pour éventuellement confirmer la divergence. Il serait aussi pertinent d'approfondir ces résultats afin de mieux les comprendre, ce que les données actuelles ne permettaient pas de faire.

5.4 Interactions avec l'âge

Les objectifs de cette recherche incluaient de déterminer la population qui y répond le mieux, le type d'entraînement le plus efficace et la FE qui s'améliore le plus. Il a été montré que les enfants de maternelle et de primaire semblaient avoir plus profité des

entraînements que les adolescents, sous la réserve d'un problème de puissance statistique permettant de détecter l'effet bénéfique chez ces derniers. Il a aussi été montré que les entraînements cognitifs, directs et indirects, semblaient mener à une amélioration des performances, à la différence des interventions sur l'environnement, avec la même réserve liée à la puissance statistique que pour l'âge. Enfin, il a été montré que la mémoire de travail est la FE qui s'améliore le plus. Afin d'atteindre plus spécifiquement l'objectif énoncé, l'âge et le type d'entraînement dans un premier temps, et l'âge et la FE dans un second temps, ont été croisés dans les analyses, afin d'affiner le premier constat.

5.4.1 Croisement de l'âge et du type d'entraînement

Il a été soulevé dans les questions exploratoires que le type d'entraînement approprié pourrait varier avec l'âge. Les analyses ont effectivement montré qu'il y avait une interaction significative : au secondaire le recours à l'entraînement cognitif indirect mène à des performances significativement meilleures qu'avec un entraînement cognitif direct, ce qui n'est pas le cas en maternelle et au primaire. Autrement dit, avec des élèves de niveau secondaire, donc des adolescents, utiliser une intervention expresse et ponctuelle, mais qui ne cible pas explicitement les FE, donnerait de meilleurs résultats qu'utiliser une intervention qui cible les FE. Ainsi, pratiquer une activité physique cognitivement exigeante serait une intervention plus efficace pour les adolescents. Les résultats n'ont fait ressortir aucune autre interaction significative. En conséquence, concernant les enfants de maternelle et ceux de primaire, il se peut que l'interaction entre l'âge et la forme de l'entraînement n'existe pas à ces âges. Il se peut aussi que le faible nombre d'études dans une catégorie d'entraînement, notamment les interventions sur l'environnement, et les entraînements cognitifs indirects en maternelle, ou encore la façon de regrouper les âges en niveau scolaire aient nui à la détection d'une telle interaction.

5.4.2 Croisement de l'âge et la FE

Parmi les questions de recherche exploratoires se trouvait celle sur un lien possible entre l'âge des participant·e·s et la FE qui s'améliorerait le plus à la suite de l'entraînement. Pour les enfants du niveau primaire, les résultats sont assez francs : la mémoire de travail s'améliore plus que le contrôle inhibiteur et la flexibilité cognitive. Bien qu'il ne s'agisse pas d'une FE, le même constat peut être fait pour le comportement : il s'améliore plus que le contrôle inhibiteur et la flexibilité cognitive à la suite de l'entraînement. Autrement dit, lorsque les entraînements sont réalisés avec des enfants du primaire, la mémoire de travail et le comportement semblent être les capacités qui en profitent le plus. Bien que les résultats soient non significatifs avec le seuil corrigé, possiblement à cause du faible nombre d'études, il est intéressant de noter qu'en maternelle et au secondaire aussi la mémoire de travail est la FE qui semble le plus profiter des entraînements, par rapport au contrôle inhibiteur notamment.

Concernant la mémoire de travail, l'explication pourrait être la même que celle mentionnée plus tôt : l'utilisation quasi constante de la mémoire de travail, même dans les tâches qui ne la ciblent pas, pourrait être à l'origine de cette amélioration plus importante. Le fait que les enfants de niveau primaire sont ceux qui bénéficient significativement de cette amélioration pourrait être causé par un nombre d'études trop faible pour trouver le même effet au secondaire et en maternelle. La tendance vers cet effet dans ces deux niveaux abonde dans ce sens. De façon complémentaire, il se peut aussi que les enfants en âge de fréquenter l'école primaire soient plus sensibles au travail de leur mémoire de travail. Cette FE se développe rapidement pendant la petite enfance, comme le contrôle inhibiteur, et est déjà efficace au primaire (Best et Miller, 2010). Cependant, elle va continuer à se développer jusque dans l'adolescence alors que le contrôle inhibiteur connaît peu de changements importants durant cette même période (Best et Miller, 2010). La flexibilité cognitive, de son côté, n'est pas encore bien développée au primaire. Autrement dit, la mémoire de travail est la seule FE à être

déjà bien opérationnelle tout en ayant encore une bonne marge de progression au primaire. En conséquence, il se peut que la période du primaire soit propice à un travail profitable de la mémoire de travail : elle sera devenue plus indépendante des autres FE, c'est-à-dire que les réseaux neuronaux se seront plus spécialisés, et elle aura atteint un niveau de développement et d'efficacité favorable à un renforcement.

Pour le comportement, la mémoire de travail pourrait être le facteur médiateur de cette amélioration notable. Alloway et Copello (2013) soulignaient l'impact de FE moins efficaces sur le comportement en classe, notamment de la mémoire de travail (Gathercole *et al.*, 2007). Quand la mémoire de travail est faible, il est par exemple plus difficile pour un enfant de se souvenir des consignes ou des causes d'une situation, menant à des comportements inadaptés, sans avoir même besoin d'invoquer un manque d'autocontrôle. En améliorant la mémoire de travail, les entraînements ont possiblement eu un impact positif aussi sur le comportement. Cela suggère par ailleurs que, chez les enfants de niveau primaire, le comportement est pour beaucoup lié à la mémoire de travail, et non uniquement au contrôle inhibiteur. Pour le confirmer, il faudrait faire des analyses qui s'intéressent spécifiquement aux enfants de niveau primaire qui ont vu leur mémoire de travail s'améliorer, pour voir si ce sont les mêmes en général qui ont aussi connu des améliorations de leurs comportements.

Croiser l'âge avec la FE permet de voir que la mémoire de travail chez les enfants du primaire est ce qui s'est le plus amélioré. Comme expliqué plus tôt, ces résultats encouragent à reconsidérer les modèles théoriques d'organisation des FE. Sans revenir sur cette considération, il demeure intéressant de la préciser. Puisque l'amélioration semble surtout visible chez les enfants du primaire, il apparaît pertinent de faire un parallèle entre le développement cognitif et les modèles d'organisation des FE. À l'heure actuelle, il existe un seul consensus concernant l'organisation des FE : elles semblent moins différenciées chez les jeunes enfants (Espy *et al.*, 2004). Parallèlement, diverses études ont montré que la mémoire de travail et le contrôle inhibiteur sont les

premières FE à montrer une certaine efficacité vers 3 à 5 ans (Best et Miller, 2010), la flexibilité cognitive se manifestant plus tard (Diamond, 2013). Prises ensemble, ces informations permettent d'interpréter les résultats obtenus sous un angle plus large. Les enfants de maternelle sont seulement au début du développement cognitif différencié. À cet âge, aucune FE ne semble bénéficier de façon claire d'un entraînement. Sans conclure que travailler les FE à cet âge est inutile, il est possible que le niveau de développement des FE soit sous-optimal pour voir des effets positifs significatifs immédiatement. Il serait cependant intéressant de comparer les performances des élèves qui ont été entraînés en maternelle avec ceux qui ont été entraînés au primaire quelques années après l'entraînement pour voir si l'effet de l'entraînement peut se détecter à ce moment-là, si l'impact bénéfique sur la mémoire de travail apparaît une fois la mémoire de travail bien développée.

Au primaire, la mémoire de travail est déjà bien développée chez la plupart des enfants tout en ayant encore une importante marge de progression (Best et Miller, 2010; Diamond, 2013), et c'est aussi la tranche d'âge qui a vu sa mémoire de travail s'améliorer avec les entraînements. Comme suggéré plus tôt, il est possible qu'à cet âge la mémoire de travail soit une FE plus centrale que les autres. Cela signifie une mobilisation plus fréquente et plus aisée que les autres FE. Dans ce cas, il semble presque logique que travailler le fonctionnement exécutif à cet âge ait des répercussions sur la mémoire de travail particulièrement. La période du primaire semble donc un moment opportun pour chercher à améliorer la mémoire de travail.

Au secondaire, toutes les FE sont présentes et différenciées, bien que la flexibilité cognitive soit encore en développement (Best et Miller, 2010; Diamond, 2013). La mémoire de travail semble avoir fini son évolution à ce stade. Les FE des élèves de ce niveau, comme ceux de maternelle, ne semblent pas profiter clairement des entraînements. Il se pourrait que la mémoire de travail puisse moins bénéficier d'un entraînement quand elle est mature ou presque. Cependant, pour le secondaire

spécifiquement, le plus faible nombre d'études encouragent à poser une conclusion temporaire.

En somme, utiliser l'âge comme variable médiatrice permet de voir qu'au secondaire les entraînements cognitifs indirects semblent plus efficaces que toute autre intervention. Cela permet aussi de constater que les enfants de niveau primaire voient leur mémoire de travail et leur comportement s'améliorer significativement plus que les autres cibles d'évaluation. Ces deux éléments devraient permettre d'affiner les recherches futures, ainsi qu'orienter les interventions potentielles.

5.6 Étude du transfert selon une méthodologie exploratoire

Les résultats ont permis de dégager certains éléments concrets caractérisant une intervention efficace, touchants à la population ciblée, le type ou les caractéristiques de l'entraînement. Cependant, le travail de méta-analyse réalisé visait aussi à mieux identifier le transfert à l'œuvre ou le transfert atteignable dans ces interventions, au-delà de la dichotomie usuelle proche-éloigné. Autrement dit, il s'agissait de regarder les données sous l'angle du transfert, et plus précisément de la typologie en 11 facteurs.

5.6.1 Portrait global

L'étude du transfert a le même objectif en éducation, en psychologie et en neurosciences : comprendre quoi, quand et comment un apprentissage quelconque est réinvesti. Quoi : quels apprentissages parviennent à être transférés? Quand : à quels moments et à quelle distance temporelle de l'apprentissage? Comment : quels mécanismes neurologiques, cognitifs, comportementaux, sociaux ou contextuels favorisent le transfert? La façon de mener ces études varie cependant selon les disciplines de recherche. En éducation et en psychologie de l'apprentissage, l'accent est mis sur les éléments contextuels et de contenu. En neuropsychologie et en

neurosciences, ce sont plutôt les facteurs internes à l'individu qui sont mis en exergue. Cela mène à une difficulté à articuler les deux approches pour appréhender la problématique du transfert dans sa globalité. Barnett et Ceci (2002) ont développé leur typologie du transfert, présentée plus tôt, notamment parce qu'ils trouvaient que l'approche neuropsychologique ignorait les éléments contextuels et ne détaillait pas assez les éléments de contenu. Leur typologie offre donc une approche systématique qui repose initialement sur la conception neuroscientifique et neuropsychologique du transfert, mais qui utilise les facteurs externes à l'apprenant pour déterminer les conditions du transfert. Leur typologie, telle que détaillée préalablement, se divise en deux catégories : le contenu et le contexte. Il faut rappeler que les variables incluses dans chacune de ces catégories ont été ajustées aux besoins de la méta-analyse réalisée.

Ainsi les variables pour lequel du transfert a été recherché sont la FE, le processus cognitif, la demande en mémoire et les connaissances pour ce qui touche au contenu transféré, puis le contexte temporel, social, de travail, fonctionnel, physique et les modalités de la tâche (présentation et réalisation) pour ce qui touche au contexte du transfert. Il faut tout d'abord mentionner que la variable contexte physique, qui s'intéressait donc à la différence d'environnement physique entre l'entraînement et l'évaluation, a été exclue à cause d'une trop grande quantité de données manquantes. Cela laisse donc 10 variables analysées. Les résultats montrent que quasiment toutes les tailles d'effet sont significatives, ce qui signifie que pour chaque variable du transfert considérée individuellement, les groupes expérimentaux, à la suite de l'intervention, se sont plus améliorés que les groupes contrôle quel que soit le niveau de transfert demandé. Autrement dit, les entraînements ont fait l'objet de transfert pour chacune des 10 variables analysées aussi longtemps qu'elles sont considérées indépendamment les unes des autres. Par exemple, pour le contexte temporel, cela signifie concrètement que les groupes expérimentaux ont été meilleurs que les groupes contrôle lors d'évaluations réalisées deux jours mais aussi trois mois après la fin de l'entraînement. Autre illustration avec la FE : les groupes expérimentaux ont en

moyenne été plus performants lors des évaluations que les groupes contrôle lorsque l'évaluation mobilisait une FE identique et différente de celle entraînée. En somme, il semble y avoir eu du transfert entre l'entraînement et l'évaluation quelle que soit la variable que l'on considère. L'apprentissage qui faisait l'objet de l'entraînement, représenté par les performances aux évaluations, semble avoir été en général réinvesti, quel que soit le contexte d'évaluation mis en place dans les études.

5.6.2 Variables de contexte du transfert qui ressortent

Pour quelques variables, le transfert ne semble pas s'être toujours opéré. Lorsque le contexte social, l'environnement social et le contexte temporel d'évaluation étaient très éloignés de celui de l'entraînement, les tailles d'effet ne sont plus significatives, signifiant que les groupes expérimentaux et contrôle ont réalisé dans ces cas des performances similaires. Concrètement, le transfert entre l'entraînement et l'évaluation ne s'est pas réalisé quand la quantité de personnes présentes dans l'environnement de travail passait d'une à un grand groupe ou l'inverse, quand le nombre de personnes impliquées dans la tâche à réaliser passait d'une à un grand groupe ou l'inverse, ou quand l'évaluation était réalisée plus de six mois après la fin de l'entraînement. Cela suggère que créer trop de différences sur ces variables entre l'entraînement et l'évaluation nuit au transfert. Concrètement, faire une évaluation plusieurs mois après l'entraînement semble nuire au transfert d'apprentissage dans ces résultats. En conséquence, l'utilité des entraînements existerait s'ils sont envisagés comme des outils de soutien ponctuel, c'est-à-dire pour dépasser un état de difficulté. Les résultats obtenus pour le facteur temporel suggèrent que les entraînements ne pourraient pas mener à des améliorations durables des performances. En revanche, utiliser les entraînements comme outils de soutien ponctuel pourrait potentiellement permettre de surmonter des difficultés de façon durable. De façon complémentaire, passer d'un travail individuel à un travail en grand groupe semble aussi nuire au transfert d'apprentissage dans ces résultats. En conséquence, des entraînements individuels

seraient peut-être moins pertinents si le but est d'améliorer des éléments touchant à la vie scolaire (performances académiques, comportements en classe). À cette fin, les résultats suggèrent qu'il est peut-être préférable d'élaborer d'emblée des entraînements de groupe.

Le transfert ne semble pas non plus avoir eu lieu lorsque le contexte temporel était identique entre l'entraînement et l'évaluation, c'est-à-dire que l'évaluation était réalisée le même jour que l'entraînement. Ainsi, dans ce contexte d'évaluation, aucun transfert temporel n'était attendu. Pourtant, les groupes qui ont réalisé une évaluation sans transfert temporel demandé, n'ont pas amélioré leurs performances à la suite de l'entraînement. Alors que les groupes qui ont réalisé les évaluations plus tard (dès le lendemain et jusqu'à six mois) ont amélioré leurs performances. Autrement dit, l'archétype du transfert proche pour la variable temps n'a pas eu lieu alors que du transfert éloigné s'est opéré. En considérant uniquement ce facteur temporel, il est possible de conclure que le transfert ne pourra pas survenir s'il est trop proche, voire inexistant. Il est préférable de laisser un temps de latence avant de réaliser l'évaluation. L'explication réside probablement dans ce qui a été explicité plus tôt sur l'espacement : il est préférable de répartir dans le temps les expositions à un même contenu d'apprentissage (Kornell, 2009), pour laisser le temps au cerveau de renforcer les connexions neuronales sous-jacentes (Bradley *et al.*, 2015). Les résultats présentés ici suggèrent qu'un espacement minimal est indispensable puisqu'en l'absence de délai temporel aucun avantage ne ressort du fait d'avoir eu un entraînement. Ainsi, il semble que, d'un point de vue temporel, les entraînements aient plus de chance de générer du transfert si on attend au moins un jour avant de tester leurs effets, mais pas plus de six mois.

Pour résumer, dans l'ensemble, modifier le contexte ne semble pas nuire à l'amélioration des performances. Donc passer d'une tâche sur ordinateur à un exercice sur papier ou passer d'un travail seul à un travail en équipe ne nuit pas au transfert des

apprentissages dans les résultats présentés. À l'exception de transferts temporels trop petits ou trop grands ainsi que de transferts sociaux trop grands.

5.6.3 Particularités liées au transfert de contenu

Tel qu'énoncé plus tôt, le transfert semble s'être opéré pour la FE, le processus cognitif, la demande en mémoire et le domaine de connaissances. Tout d'abord, il faut préciser que le transfert ne s'est visiblement pas opéré quand le domaine de connaissances utilisé pour l'évaluation était de degré 4, ce qui signifie des domaines de connaissances assez différents, par exemple mathématiques et français. Cependant, ce résultat est à interpréter avec prudence pour deux raisons complémentaires. Tout d'abord, il y a très peu d'études pour ce degré de transfert (seulement 11 études) comparativement aux autres degrés de la même variable « domaine de connaissances ». Ainsi, le résultat observé pourrait être la conséquence d'un manque de puissance statistique plus qu'une réelle absence d'effet. Ensuite, pour le degré 5 de la variable « domaine de connaissances », donc un degré plus élevé, c'est-à-dire un type de transfert encore plus éloigné, par exemple entre mathématiques et arts, le résultat est significatif avec 65 études. Autrement dit, le transfert s'est opéré pour le degré 5 alors qu'il ne s'est pas opéré pour le degré 4. Dans la mesure où un manque de puissance statistique est soupçonné pour le degré 4 et que le degré supérieur est significatif avec plus d'études, il est probable que l'absence de significativité du transfert pour le degré 4 du domaine de connaissances soit une conséquence de la méthode d'analyse et donc un résultat non interprétable en l'état.

Ensuite, il convient de s'arrêter sur le transfert entre FE dans la mesure où c'est particulièrement inattendu : les recherches antérieures concluent souvent à l'absence de transfert entre FE (p. ex., Melby-Lervåg et Hulme, 2013). Il est possible de lier ce résultat aux arguments proposés pour expliquer l'amélioration plus importante de la mémoire de travail : la mémoire de travail pourrait occuper une place plus centrale dans

le fonctionnement exécutif chez les enfants et adolescents, et plus particulièrement au niveau primaire, qui pourrait être la source de ce transfert entre FE. Autrement dit, plus qu'un phénomène de transfert entre FE, ce serait plutôt un travail non sollicité de la mémoire de travail qui mènerait à cette interprétation de transfert. Par ailleurs, la présence de transfert entre FE est possiblement due au jeune âge de la population étudiée. Il serait intéressant de vérifier si ces résultats se maintiennent avec une population d'adultes.

D'autres éléments sont à prendre en considération dans l'interprétation de ce transfert inattendu. Premièrement, le codage de la variable FE n'a que deux niveaux. Cela signifie qu'il y a le niveau FE identique entre l'entraînement et l'évaluation et le niveau FE différente. En ayant seulement deux niveaux, l'analyse du transfert est moins profonde et se résume à absence ou présence de transfert. Cela joue possiblement dans l'obtention d'un transfert même quand la FE est différente. Si la variable FE avait eu plus de niveaux comme la plupart des variables liées au contexte du transfert, les résultats auraient probablement été autres. Bien que cela n'ait pas été anticipé lors de la conception de la grille de codage, il serait possible de fusionner les variables processus cognitifs et FE afin d'avoir un niveau 1 où c'est la même FE et le même processus cognitif mobilisés lors de l'entraînement et de l'évaluation, un niveau 2 où c'est la même FE mais un processus cognitif différent, et un niveau 3 où c'est une FE différente. En créant trois niveaux, les études seraient plus distribuées et les résultats plus nuancés. Deuxièmement, les analyses utilisées dans le travail présenté ici reposent sur le modèle hiérarchique corrélé. Comme expliqué plus tôt, cette procédure n'a pas encore été utilisée dans des méta-analyses d'entraînements cognitifs. En conséquence, les résultats obtenus avec cette procédure peuvent diverger de ce qui est obtenu d'ordinaire en partie à cause du processus d'analyses lui-même. Seules des méta-analyses futures recourant à la même méthode permettront de répondre à cette question.

5.6.4 Parallèle entre les degrés de transfert et la dichotomie transfert proche – transfert éloigné

Au sein de chaque variable du transfert, une comparaison des degrés d'éloignement entre l'entraînement et l'évaluation a été réalisée, et plus précisément entre le degré 1 et chaque autre degré pour voir si l'augmentation de l'éloignement se reflétait dans les performances aux tâches d'évaluation. Les attentes étaient de voir les performances diminuer avec une augmentation des degrés de transfert, puisque le transfert éloigné est rarement observé (Melby-Lervåg et Hulme, 2013; Sala et Gobet, 2017). Pourtant, toutes ces comparaisons sont non significatives. Autrement dit, les performances des participant·e·s sont statistiquement similaires que du transfert ait été demandé ou non, même quand un transfert de degré 5 entre l'entraînement et l'évaluation était attendu, et ce pour les 10 variables du transfert.

Une interprétation possible est qu'un contexte de transfert proche donne des résultats statistiquement similaires à un contexte de transfert éloigné. Cependant, cela est contraire à la plupart des données existantes dans la recherche sur le transfert (Melby-Lervåg et Hulme, 2013; Redick *et al.*, 2013; Sala et Gobet, 2017). Dans la mesure où par ailleurs la distinction transfert proche-transfert éloigné a été reproduite avec les mêmes données en appliquant une procédure imitant le traitement habituel du transfert, il semble plus probable que l'explication ne soit pas dans les tailles d'effet en elles-mêmes.

Une autre interprétation pourrait être un effet de la décomposition du transfert en 10 variables. Cette décomposition permet de voir jusqu'à quel degré de transfert les entraînements restent efficaces pour chaque variable du transfert. Par exemple, pour la variable du transfert temporel, jusqu'au degré 4 c'est significativement efficace, alors que ça ne l'est plus au degré 5. Cette procédure a permis d'amener des précisions sur l'ampleur de la variation à mettre en place pour observer du transfert. Autrement dit,

cette procédure a fait ressortir certaines limites concrètes au transfert. Idéalement, elle aurait aussi permis, pour chaque variable du transfert, de comparer les performances atteintes en fonction du degré d'éloignement, c'est-à-dire faire ressortir un effet de diminution progressif des performances avec l'augmentation des degrés ou encore un effet de seuil. Cela ne s'est pas produit puisque les comparaisons sont non significatives. Il est alors possible d'imaginer qu'il y ait une interaction entre les variables du transfert qui se perde quand on décompose le transfert. Ces 10 variables du transfert sont avant tout des facteurs dans les situations d'apprentissage, qui potentiellement contribuent chacun à un phénomène global de transfert, différent du transfert décomposé en variables. L'interaction entre les variables du transfert pourrait être le facteur qui ferait que, considéré globalement, le transfert éloigné serait très rare, mais une fois décomposé semble possible. En ignorant cette interaction, peut-être devient-il impossible de voir que le transfert éloigné est difficile, expliquant pourquoi les analyses ne montrent pas un déclin significatif des performances quand les degrés de transfert augmentent.

5.6.5 Interprétations renforcées par les scores de transfert

Les analyses de régression avec les scores de transfert de contenu et de contexte en variable continue donnent des résultats significatifs : plus le transfert est grand, plus les tailles d'effet diminuent. Ces résultats sont en accord avec les recherches antérieures (Melby-Lervåg et Hulme, 2013; Sala et Gobet, 2017), ils vont aussi dans le même sens que l'analyse visant à reproduire la dichotomie transfert proche – transfert éloigné. Cependant, les mêmes analyses avec le score de transfert global ne donnent aucun résultat significatif, c'est-à-dire que l'effet de diminution des performances avec l'augmentation du transfert est perdu quand on fusionne les éléments liés au contenu transféré et les éléments liés au contexte du transfert.

Cela va dans le même sens que certains points soulevés plus tôt. Quand le transfert est étudié à travers plusieurs variables, cela donne certains résultats. Quand il est réduit à un élément, les résultats deviennent non significatifs. Il semble, à travers ces différents résultats, que, selon la décomposition du transfert, les résultats obtenus diffèrent. Quand tout est séparé en 10 facteurs, quasiment aucun effet lié au transfert n'est détecté, mais tous les résultats ou presque sont significatifs. Quand le transfert est fusionné en score en laissant le contenu et le contexte séparé, l'effet habituel de diminution des performances avec l'augmentation du transfert est observé. Enfin, quand tout est fusionné, les résultats deviennent non significatifs. Une explication de la variation des résultats pour ce qui est supposé être la même chose pourrait être une trop grande variance dans les données fusionnées, une mise en commun d'éléments de nature assez différent. En l'état, le codage des données ne permet pas de pousser plus loin cette réflexion, il apparaît cependant clair que la façon de coder le transfert a un impact sur les résultats et sur l'interprétation du transfert obtenu, ce qui nécessiterait de cibler expressément cette question dans des recherches futures.

Par ailleurs, le travail présenté ici constituait aussi une tentative de création de niveaux de transfert plus fins que les deux habituels. Il s'agissait de dégager des niveaux intermédiaires de transfert entre ou autour des deux catégories habituelles que sont le transfert proche et le transfert éloigné. À cette fin, à partir des scores de transfert (global, de contenu et de contexte), des niveaux un à quatre de transfert avait été dégagés de façon exploratoire. Il est observé que la seule comparaison significative est entre le score global de transfert des niveaux 1 et 2, avec des tailles d'effet plus grandes pour le niveau 2 que le niveau 1. Ainsi, un transfert global moyen donne des performances supérieures à un transfert réduit. Tout d'abord, ce résultat est inattendu. Il est difficile d'expliquer que le transfert global de niveau 2 donne de meilleurs résultats que le niveau 1. Il serait possible d'en conclure, que tous les facteurs du transfert mis ensemble, il est préférable de planifier du transfert dans le contenu et le contexte afin de favoriser de bonnes performances. Cependant, cela va à l'encontre des

recherches antérieures qui posent que la similarité des tâches est associée à plus de transfert (Day et Goldstone, 2012). De plus, d'autres résultats cités précédemment ne coïncident pas avec cette conclusion. Il faut alors prendre en considération la procédure de création des scores de transfert. Pour chaque étude incluse dans la méta-analyse, un score de transfert global a été calculé qui regroupe les 11 facteurs du transfert. Pour quasiment toutes les études, il y avait des données manquantes liées à la façon dont les données sont rapportées dans les articles. Dans la formule de calcul des scores de transfert, ce problème de données manquantes a été pris en considération afin d'avoir des scores comparables. Cependant, cela n'enlève pas le fait que les données ne sont pas manquantes pour les mêmes variables d'une étude à l'autre. Ainsi les études qui ont servi à calculer les scores de transfert de niveau 1 ne sont pas les mêmes que celles qui ont servi à calculer les scores de transfert de niveau 2 et n'ont donc pas des données manquantes au niveau des mêmes variables. Cela a peut-être créé un biais qui mène au résultat contradictoire avec les recherches antérieures et avec des résultats du présent travail.

Enfin, concernant les niveaux de transfert, il est encore important de poser clairement que les analyses réalisées et les résultats obtenus ne permettent pas de proposer de nouveaux niveaux de transfert. Ce constat transparissait déjà dans les analyses 11 variables du transfert individuellement : il n'y avait pas de différence significative entre les différents degrés du transfert. Quand on fusionne les variables en différents scores de transfert, aucune différence ne ressort non plus. Il demeure pertinent de chercher à affiner les niveaux de transfert afin de mieux cerner où s'arrête le potentiel de transfert afin de s'affranchir de la terminologie de proche – éloigné. Cela nécessitera d'autres recherches. Il pourrait alors être pertinent, au vu des résultats non significatifs obtenus, de se focaliser sur un domaine de transfert à la fois. Puisqu'en mettant en commun des entraînements très variés la question du transfert n'a pu être précisée, définir les limites du transfert d'une façon précise afin de savoir comment l'exploiter

passera peut-être par trouver les limites propres à chaque domaine d'intérêt plutôt qu'une limite globale.

5.6.6 Absence de facteurs facilitants ou limitatifs du transfert

Un élément qui ressort des résultats est qu'il ne semble pas y avoir de variables du transfert plus importantes, influentes ou délétères que d'autres dans la mesure où le portrait du transfert est assez similaire d'une variable à l'autre. Que ce soit le nombre de personnes impliquées dans les tâches, les lieux d'exécution, les processus cognitifs mobilisés, aucun facteur du transfert ne se démarque. Aucun facteur ne montre une absence totale de transfert. Autrement dit, que ce soient les facteurs du contenu transféré ou du contexte dans lequel a lieu le transfert, pris individuellement, il est impossible d'identifier un facteur pour lequel le transfert serait significativement plus difficile ou au contraire plus probable.

De façon exploratoire, l'âge a aussi été considéré comme un facteur pouvant influencer sur le transfert. Maintenant qu'il est posé que chaque variable du transfert prise individuellement ne permet pas de voir quelles variables sont influentes ou délétères et donc ne permet pas de comprendre pourquoi le transfert éloigné est difficile à atteindre, introduire l'âge comme variable médiatrice semble encore plus pertinent. Cependant, les résultats sont non significatifs. Que ce soit en prenant le transfert global ou en séparant en transfert de contenu et transfert de contexte, aucune interaction avec l'âge ne ressort. En somme, les données indiquent que le transfert est similaire à la fois pour les facteurs liés au contenu et au contexte quel que soit l'âge des apprenants, qui sont tous ici des enfants ou des adolescents. La conclusion serait peut-être différente si des adultes faisaient partie des échantillons.

Pour finir, le tableau suivant (Tableau 5.1) propose une synthèse des hypothèses et questions exploratoires accompagnées des réponses que les résultats ont pu y apporter.

Tableau 5.1

Hypothèses et questions exploratoires et leurs conclusions.

Hypothèses	Variation dans les performances en fonction de l'âge.	Effet significatif des entraînements en maternelle et au primaire, mais pas au secondaire; aucune différence entre maternelle et primaire.
	Plus le transfert est grand, moins il sera observé.	Une diminution des performances avec l'augmentation du transfert ne ressort pas, sauf pour le facteur temporel (délai de plus de 6 mois) et les facteurs sociaux (passer de 1 personne à un grand groupe ou l'inverse). Une absence de délai temporel aussi semble nuire au transfert.
	Les entraînements de type adaptatif produisent plus d'effets.	Les entraînements de type adaptatif (à la hausse ou pur) donnent significativement de meilleures performances que les entraînements sans variation de la difficulté ou avec une variation prédéterminée.
	Le recours à un groupe contrôle passif donne des résultats plus élevés.	Le recours à un groupe contrôle passif, un groupe faisant une tâche non exigeante cognitivement ou un groupe réalisant une forme allégée d'un entraînement cognitif direct facilite l'observation de résultats positifs significatifs par rapport à avoir un groupe contrôle qui fait une tâche exigeante pour les FE ou un entraînement cognitif indirect.
Questions exploratoires sur le transfert	Jusqu'à quel niveau de transfert les entraînements s'avèrent-ils efficaces?	Les 10 facteurs du transfert donnent des résultats significatifs, mais la significativité disparaît lorsque ces facteurs sont regroupés en un seul facteur. De plus, il n'y aucune différence statistique entre les niveaux de transfert pour chacun des 10 facteurs. Exceptions pour les niveaux maximum de transfert des facteurs temporel (transfert mesuré moins de deux jours ou plus de six mois après l'entraînement) et sociaux (passer d'un travail seul à un grand groupe ou inversement) où la significativité disparaît.
	L'âge ou le type d'entraînement ont-ils un rôle de modérateurs sur les niveaux de transfert atteints?	L'âge ne joue pas de rôle modérateur entre l'entraînement et le transfert.

Questions exploratoires sur les caractéristiques des entraînements	Pourrait-il y avoir un effet différent du type d'entraînement en fonction de l'âge?	Les entraînements de type cognitifs directs et indirects ont globalement des effets significatifs, mais pas les interventions sur l'environnement. Spécifiquement, au secondaire, les entraînements cognitifs indirects donnent les meilleurs résultats.
	L'âge pourrait-il être lié à la FE ou la compétence qui s'améliorera le plus à la suite de l'entraînement?	Toutes les cibles d'évaluation semblent s'améliorer à la suite d'un entraînement, mais la mémoire de travail plus que les autres et particulièrement au primaire.
	Le fait d'entraîner plusieurs FE en même temps pourrait-il être plus efficace?	Entraîner aucune, une seule ou plusieurs FE donnent des effets significatifs, statistiquement similaires.
	Avoir une durée globale d'entraînement plus longue ou des séances plus fréquentes pourrait-il être plus efficace?	Pas d'effet significatif.

5.7 Apport de cette étude quant au transfert

Le transfert a été décomposé en 10 variables afin d'offrir une perspective nouvelle et ainsi contribuer à améliorer sa compréhension. Bien que les résultats obtenus soient mitigés, il convient de souligner ce que ce traitement du transfert a apporté.

Tout d'abord, isoler les différents facteurs du transfert dans le domaine de l'entraînement cognitif est une approche novatrice. Dans la mesure où les études s'intéressant à la question du transfert dans le cadre de ces entraînements ne parviennent pas à aller plus loin que la dichotomie transfert proche – transfert éloigné avec la méthodologie habituelle, adopter une nouvelle procédure est un pas vers une compréhension approfondie. Afin de consolider les acquis des études antérieures ou

apporter des éléments de réflexion, il est important d'explorer de diverses façons une même problématique. Recourir à la typologie de Barnett et Ceci (2002) pour les entraînements cognitifs avait cet objectif.

Ce processus de traitement du transfert a aussi permis de faire entrer les facteurs touchant au contexte du transfert des entraînements cognitifs. Jusque-là, les facteurs considérés pour traiter du transfert dans ce domaine étaient essentiellement la FE mobilisée et le domaine de connaissances. Tel que le montrent les recherches sur le transfert dans des domaines tout à fait différents, le contexte est un élément qui peut être crucial (Giamellaro, 2014) à la réalisation du transfert. Bien que les analyses n'aient pas permis de trouver, pour l'entraînement cognitif, si un facteur était plus important qu'un autre, elles ont tout de même montré que les facteurs sociaux et temporels nuisaient au transfert quand ils étaient trop différents entre l'entraînement et l'évaluation. Cela suggère que lorsque le transfert ne s'opère pas, ce n'est pas nécessairement un problème de FE mobilisée.

5.8 Retombées pédagogiques

Les résultats obtenus dans ce travail et discutés ici demeurent peut-être trop vagues pour être vraiment pertinents, pour guider le choix d'élaborer un entraînement ou non, de quelle forme lui donner. Cependant, quelques éléments ressortent tout de même. Ils mériteraient donc d'être pris en considération dans le cas de la création d'un entraînement cognitif.

Dans la mesure où le but est une amélioration du fonctionnement exécutif, il semble que travailler avec des enfants au primaire, comparativement à ceux de la maternelle ou du secondaire, soit le meilleur choix. Sous toute réserve, cette tranche d'âge semble la plus susceptible d'obtenir des résultats significatifs à la suite d'un entraînement. Il serait visiblement aussi préférable de choisir un entraînement cognitif direct ou

indirect, c'est-à-dire un entraînement qui travaille explicitement les FE ou un entraînement d'activité physique par exemple. Autrement dit, des interventions ponctuelles plutôt qu'à longueur d'année. Cependant, pour les entraînements cognitifs directs, cela vient souvent avec la contrainte d'un entraînement individuel. Or les résultats suggèrent que la transférabilité des effets de l'entraînement se fait mal quand le contexte de travail passe d'une personne à la salle de classe. Il faudrait alors élaborer ou sélectionner des entraînements cognitifs directs qui se font en groupe. Enfin, il faudrait considérer le facteur temporel. Il semble qu'un entraînement trop éloigné dans le temps de l'évaluation soit peu bénéfique. Autrement dit, pour tirer un profit maximal de l'entraînement, il conviendrait de planifier les tâches avec lesquelles il serait lié en fonction du moment où l'entraînement serait réalisé.

5.8 Limites

À travers les divers éléments objet de cette discussion, il ressort plusieurs limites. Sur le plan méthodologique, la fidélité a été vérifiée uniquement pour la sélection des études, pas pour le codage desdites études. Il aurait été pertinent de mettre en place un processus de contre-codage pour s'assurer que le codage des variables des études était systématique et utilisable par d'autres personnes à l'avenir. Toujours concernant le codage, coder l'âge en niveaux scolaires gagnerait à être revu pour devenir un véritable codage en âge afin d'affiner les analyses et donc potentiellement les résultats. Au passage, un peu de puissance statistique pourrait être perdue pour les tranches d'âge avec le moins de participant·e·s, mais cela apporterait aussi probablement un tableau plus précis des liens entre l'âge et le type d'entraînement, la FE la plus pertinente à travailler et même peut-être le transfert. Toujours dans le cadre du codage, plusieurs variables ont été codées de façon binaire, comme la FE. Il a été proposé que cela constituait potentiellement un obstacle à l'observation de résultats significatifs. En conséquence, il serait judicieux à l'avenir d'éviter au maximum les variables binaires

lors de l'utilisation de la même typologie du transfert. Ainsi, les résultats devraient être affinés. Ensuite, la méta-analyse réalisée regroupe des études dites d'entraînement cognitif très variées, notamment en ce qui concerne les types d'entraînement et les populations. Cela mène, pour certaines combinaisons de variables, à avoir peu d'études dans une catégorie. C'est particulièrement vrai au secondaire et en maternelle et pour les interventions sur l'environnement. En conséquence, ces combinaisons de variables sont moins représentées dans l'échantillon total des études de la méta-analyse, et donc ont moins de poids dans les analyses, diminuant les chances d'en dégager des résultats significatifs. Il serait utile à l'avenir, avec un devis de recherche semblable, de faire en sorte d'avoir un nombre équivalent d'études dans chacune des catégories. En ce qui concerne le transfert, il semble nécessaire de continuer à approfondir le lien entre le transfert global et les facteurs du transfert. Le premier pas réalisé dans ce travail permet de montrer la place des différents facteurs du transfert. Il faut maintenant le compléter, pour améliorer la compréhension de pourquoi le transfert global est difficile à obtenir. Enfin, il est important de rappeler que la méthode d'analyses utilisées dans ce travail n'est pas celle habituellement utilisée dans les méta-analyses d'études d'entraînements cognitifs. Elle a notamment été choisie pour cette raison, cependant, cela complexifie les comparaisons avec les méta-analyses antérieures.

5.9 Conclusion

Ce travail avait pour ambition d'offrir une nouvelle perspective sur les études d'entraînement cognitif chez les enfants et les adolescents, qui visent à soutenir ou améliorer les FE, en adoptant une nouvelle façon d'opérationnaliser le transfert d'apprentissage dans ce domaine. Le transfert a été examiné à travers les différents facteurs qui le composent plutôt que comme une entité indivisible. Il ressort que la mémoire de travail semble plus bénéficier des entraînements que les autres FE, surtout chez les enfants du primaire, avec des entraînements ponctuels, quand les facteurs

temporels et sociaux ne changent pas trop entre l'entraînement et l'évaluation. Ces résultats sont à considérer prudemment en raison de plusieurs limites méthodologiques, cependant ils sont un pas vers une meilleure caractérisation des entraînements cognitifs efficaces. Par ailleurs, le recours à la typologie en 11 facteurs a permis de montrer que certains facteurs contextuels pouvaient poser des limites concrètes au transfert d'apprentissage. En revanche, de façon inattendue, aucune limite au transfert entre FE n'a été trouvée, ce qui doit mener à des interprétations prudentes. Aussi, il ne s'est pas avéré possible de dégager des niveaux de transfert pertinent pour une compréhension approfondie des résultats des entraînements cognitifs. D'une manière générale, de nombreuses limites de cette étude sont peut-être liées à la méthode d'analyses statistiques inusitée dans ce domaine, bien que recommandée. Par ailleurs, il est probable que l'opérationnalisation du transfert retenue se soit pas optimale. Cependant, il semble pertinent de persévérer dans l'élaboration d'une nouvelle opérationnalisation du transfert.

Certains résultats obtenus encouragent à continuer dans cette voie, car ils offrent un point de vue non proposé jusque-là. Des recherches futures dans ce sens pourraient aider à mieux comprendre pourquoi certains entraînements mènent à du transfert et d'autres non. Il serait aussi intéressant à l'avenir d'avoir plus d'études avec des participants au secondaire pour voir si l'effet de l'âge trouvé est réel ou une conséquence d'un manque de puissance. Dans le même registre, il semble nécessaire de refaire une méta-analyse similaire en utilisant l'âge et non le niveau scolaire afin d'affiner cet effet de l'âge en maternelle et au primaire.

RÉFÉRENCES

- Abreu-Mendoza, R. A., Chamorro, Y., Garcia-Barrera, M. A. et Matute, E. (2018). The contributions of executive functions to mathematical learning difficulties and mathematical talent during adolescence. *PloS One*, *13*(12), e0209267. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0209267>
- Adams, L. T., Kasserian, J. E., Yearwood, A. A., Perfetto, G. A., Bransford, J. D. et Franks, J. J. (1988). Memory access: The effects of fact-oriented versus problem-oriented acquisition. *Memory and Cognition*, *16*(2), 167–175. <https://doi.org/10.3758/bf03213486>
- Ahmed, S. F., Tang, S., Waters, N. E. et Davis-Kean, P. (2018). 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>
- Allan, N. P., Hume, L. E., Allan, D. M., Farrington, A. L. et Lonigan, C. J. (2014). Relations between inhibitory control and the development of academic skills in preschool and kindergarten: A meta-analysis. *Developmental Psychology*, *50*(10), 2368-2379. doi: <https://doi.org/10.1111/1469-7610.00228>
- Alloway, T. P. et Alloway, R. G. (2010). Investigating the predictive roles of working memory and IQ in academic attainment. *Journal of Experimental Child Psychology*, *106*(1), 20-29. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2009.11.003>
- Alloway, T. P. et Copello, E. (2013). Working memory: The what, the why, and the how. *The Australian Educational and Developmental Psychologist*, *30*(2), 105-118. <https://doi.org/10.1017/edp.2013.13>
- Alloway, T. P. et Passolunghi, M. C. (2011). The relationship between working memory, IQ, and mathematical skills in children. *Learning and Individual Differences*, *21*(1), 133-137. <https://doi.org/10.1016/j.lindif.2010.09.013>

- Altemeier, L., Jones, J., Abbott, R. D. et Berninger, V. W. (2006). Executive functions in becoming writing readers and reading writers: Note taking and report writing in third and fifth graders. *Developmental Neuropsychology*, 29(1), 161-173. https://doi.org/10.1207/s15326942dn2901_8
- Anolli, L., Antonietti, A., Crisafulli, L. et Cantoia, M. (2001). Accessing source information in analogical problem-solving. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology Section A*, 54(1), 237–261. <https://doi.org/10.1080/02724980042000093>
- Antony, J. W., Gobel, E. W., O'hare, J. K., Reber, P. J. et Paller, K. A. (2012). Cued memory reactivation during sleep influences skill learning. *Nature Neuroscience*, 15(8), 1114-1116. <https://doi.org/10.1038/nn.3152>
- Arán Filippetti, V. et Krumm, G. (2020). A hierarchical model of cognitive flexibility in children: Extending the relationship between flexibility, creativity and academic achievement. *Child Neuropsychology*, 26(6), 770-800. <https://doi.org/10.1080/09297049.2019.1711034>
- Au, J., Sheehan, E., Tsai, N., Duncan, G. J., Buschkuehl, M. et Jaeggi, S. M. (2015). Improving fluid intelligence with training on working memory: A meta-analysis. *Psychonomic Bulletin and Review*, 22(2), 366-377. <https://doi.org/10.3758/s13423-014-0699-x>
- Baddeley, A. D. (1992). Working memory: The interface between memory and cognition. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 4(3), 281–288. <https://doi.org/10.1162/jocn.1992.4.3.281>
- Baddeley, A. D. (2000). The episodic buffer: A new component of working memory? *Trends in Cognitive Sciences*, 4(11), 417-423. [https://doi.org/10.1016/S1364-6613\(00\)01538-2](https://doi.org/10.1016/S1364-6613(00)01538-2)
- Baddeley, A. D. (2003). Working memory: Looking back and looking forward. *Nature Reviews Neuroscience*, 4(10), 829-839. <https://doi.org/10.1038/nrn1201>

- Baddeley, A. D. et Hitch, G. J. (1974). Working memory. Dans G. H. Bower (dir.), *Psychology of Learning and Motivation*(vol. 8, p. 47-89). Academic Press.
[https://doi.org/10.1016/S0079-7421\(08\)60452-1](https://doi.org/10.1016/S0079-7421(08)60452-1)
- Baddeley, A. D. et Hitch, G. J. (1994). Developments in the concept of working memory. *Neuropsychology*, 8(4), 485-493. <https://doi.org/10.1037/0894-4105.8.4.485>
- Barnett, S. M. et Ceci, S. J. (2002). When and where do we apply what we learn? : A taxonomy for far transfer. *Psychological Bulletin*, 128(4), 612–637.
<https://doi.org/10.1037/0033-2909.128.4.612>
- Bartolotti, J. (2015). *Previous language experience shapes novel language learning*. (Thèse de doctorat, Northwestern University).
<https://search.proquest.com/docview/1752113234?accountid=12543>
- Bauer, P. J. et Varga, N. L. (2016). Les neurosciences cognitives du développement de la mémoire : implications pour les sciences de l'éducation. Dans É. Tardif et P.— A. Doudin (dir.), *Neurosciences et cognition : perspectives pour les sciences de l'éducation* (p. 135-164). De Boeck Supérieur.
- 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>
- Best, J. R., Miller, P. H. et Naglieri, J. A. (2011). Relations between executive function and academic achievement from ages 5 to 17 in a large, representative national sample. *Learning and Individual Differences*, 21(4), 327-336.
<https://doi.org/10.1016/j.lindif.2011.01.007>
- Blakey, E. et Carroll, D. J. (2015). A short executive function training program improves preschoolers' working memory. *Frontiers in Psychology*, 6, Article 1827. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2015.01827>
- Blair, C. (2002). School readiness: Integrating cognition and emotion in a neurobiological conceptualization of children's functioning at school entry. *American Psychologist*, 57(2), 111-127. <https://doi.org/10.1037/0003-066x.57.2.111>

- Blair, C. et Diamond, A. (2008). Biological processes in prevention and intervention: The promotion of self-regulation as a means of preventing school failure. *Development and Psychopathology*, 20(3), 899-911. <https://doi.org/10.1017/S0954579408000436>
- Blair, C. et Razza, R. P. (2007). Relating effortful control, executive function, and false belief understanding to emerging math and literacy ability in kindergarten. *Child Development*, 78(2), 647-663. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8624.2007.01019.x>
- Blums, A., Belsky, J., Grimm, K. et Chen, Z. (2017). Building links between early socioeconomic status, cognitive ability, and math and science achievement. *Journal of Cognition and Development*, 18(1), 16-40. <https://doi.org/10.1080/15248372.2016.1228652>
- Bracke, D. (1998). Vers un modèle théorique du transfert : les contraintes à respecter. *Revue des sciences de l'éducation*, 24(2), 235-266. <https://doi.org/10.7202/502010ar>
- Bradley, M. M., Costa, V. D., Ferrari, V., Codispoti, M., Fitzsimmons, J. R. et Lang, P. J. (2015). Imaging distributed and massed repetitions of natural scenes: Spontaneous retrieval and maintenance. *Human Brain Mapping*, 36(4), 1381-1392. <https://doi.org/10.1002/hbm.22708>
- Bransford, J. D. et Schwartz, D. L. (1999). Rethinking transfer: A simple proposal with multiple implications. *Review of Research in Education*, 24(1), 61-100. <https://doi.org/10.3102%2F0091732X024001061>
- Brault Foisy, L.-M., Potvin, P., Riopel, M. et Masson, S. (2015). Is inhibition involved in overcoming a common physics misconception in mechanics? *Trends in Neuroscience and Education*, 4(1-2), 26-36. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.tine.2015.03.001>
- Braver, T. S., Cole, M. W. et Yarkoni, T. (2010). Vive les différences ! Individual variation in neural mechanisms of executive control. *Current Opinion in Neurobiology*, 20(2), 242-250. <https://doi.org/10.1016/j.comb.2010.03.002>

- Brown, A. L. (1990). Domain-specific principles affect learning and transfer in children. *Cognitive Science*, 14(1), 107–133.
https://doi.org/10.1207/s15516709cog1401_6
- Brown, A. L., Kane, M. J. et Echols, C. H. (1986). Young children's mental models determine analogical transfer across problems with a common goal structure. *Cognitive Development*, 1(2), 103-121. [https://doi.org/10.1016/S0885-2014\(86\)80014-4](https://doi.org/10.1016/S0885-2014(86)80014-4)
- 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>
- Bull, R., Espy, K. A. et Wiebe, S. A. (2008). Short-term memory, working memory, and executive functioning in preschoolers: Longitudinal predictors of mathematical achievement at age 7 years. *Developmental Neuropsychology*, 33(3), 205-228. <https://doi.org/10.1080/87565640801982312>
- 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>
- Bull, R. et Scerif, G. (2001). Executive functioning as a predictor of children's mathematics ability: Inhibition, switching, and working memory. *Developmental Neuropsychology*, 19(3), 273-293.
https://doi.org/10.1207/S15326942DN1903_3
- Burgess, P. W., Alderman, N., Evans, J., Emslie, H. et Wilson, B. A. (1998). The ecological validity of tests of executive function. *Journal of the International Neuropsychological Society*, 4(6), 547–558.
<https://doi.org/10.1017/S1355617798466037>
- 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>

- Butterfield, E. C. et Nelson, G. D. (1991). Promoting positive transfer of different types. *Cognition and Instruction*, 8(1), 69–102.
<http://www.jstor.org.proxy.bibliotheques.uqam.ca/stable/3233510>
- Callan, D. E. et Schweighofer, N. (2010). Neural correlates of the spacing effect in explicit verbal semantic encoding support the deficient-processing theory. *Human Brain Mapping*, 31(4), 645-659. <https://doi.org/10.1002/hbm.20894>
- Camerota, M., Willoughby, M. T., Kuhn, L. J. et Blair, C. B. (2018). The childhood executive functioning inventory (CHEXI): Factor structure, measurement invariance, and correlates in US preschoolers. *Child Neuropsychology*, 24(3), 322–337. <https://doi.org/10.1080/09297049.2016.1247795>
- Carraher, T. N., Carraher, D. W. et Schliemann, A. D. (1987). Written and oral mathematics. *Journal for Research in Mathematics Education*, 18(2), 83–97.
<https://doi.org/10.2307/749244>
- Carretti, B., Borella, E., Cornoldi, C. et De Beni, R. (2009). Role of working memory in explaining the performance of individuals with specific reading comprehension difficulties: A meta-analysis. *Learning and Individual Differences*, 19(2), 246-251. <https://doi.org/10.1016/j.lindif.2008.10.002>
- Cartwright, K. B. (2012). Insights from cognitive neuroscience: The importance of executive function for early reading development and education. *Early Education and Development*, 23(1), 24-36.
<https://doi.org/10.1080/10409289.2011.615025>
- Cattell, R. B. (1963). Theory of fluid and crystallized intelligence: A critical experiment. *Journal of Educational Psychology*, 54(1), 1-22.
<https://doi.org/10.1037/h0046743>
- Chaddock-Heyman, L., Erickson, K. I., Voss, M., Knecht, A., Pontifex, M. B., Castelli, D., Hillman, C. H. et Kramer, A. (2013). The effects of physical activity on functional MRI activation associated with cognitive control in children: A randomized controlled intervention. *Frontiers in Human Neuroscience*, 7, Article 72. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2013.00072>

- Chein, J. M. et Morrison, A. B. (2010). Expanding the mind's workspace: Training and transfer effects with a complex working memory span task. *Psychonomic Bulletin and review*, 17(2), 193-199. <https://doi.org/10.3758/PBR.17.2.193>
- Chein, J. M. et Schneider, W. (2005). Neuroimaging studies of practice-related change: fMRI and meta-analytic evidence of a domain-general control network for learning. *Cognitive Brain Research*, 25(3), 607-623. <https://doi.org/10.1016/j.cogbrainres.2005.08.013>
- Clark, D. B., Tanner-Smith, E. E. et Killingsworth, S. S. (2016). Digital games, design, and learning: A systematic review and meta-analysis. *Review of Educational Research*, 86(1), 79–122. <https://doi.org/10.3102/0034654315582065>
- Clement, C. A., Mawby, R. et Giles, D. E. (1994). The Effects of manifest relational similarity on analog retrieval. *Journal of Memory and Language*, 33(3), 396–420. <https://doi.org/10.1006/jmla.1994.1019>
- Cormier, S. M. et Hagman, J. D. (1987). Introduction. Dans S. M. Cormier et J. D. Hagman (dir.), *Transfer of learning: Contemporary research and applications* (p. 1–8). San Diego, California: Academic press.
- Cowan, N. (1988). Evolving conceptions of memory storage, selective attention, and their mutual constraints within the human information-processing system. *Psychological Bulletin*, 104(2), 163. <https://doi.org/10.1037/0033-2909.104.2.163>
- Cowan, N. (2000). The magical number 4 in short-term memory: A reconsideration of mental storage capacity. *Behavioral and Brain Sciences*, 24(1), 87-185. <https://doi.org/10.1017/S0140525X01003922>
- Cowan, N. (2010). The magical mystery four: How is working memory capacity limited, and why?. *Current Directions in Psychological Science*, 19(1), 51–57. <https://doi.org/10.1177/0963721409359277>
- Cowan, N. (2017). The many faces of working memory and short-term storage. *Psychonomic Bulletin and Review*, 24(4), 1158-1170. <https://doi.org/10.3758/s13423-016-1191-6>

- Cyr, A.-A. (2012). *Évaluation de l'impact d'interventions en orthographe sur le transfert des apprentissages, dans différents contextes d'écriture, auprès d'élèves en difficulté du 2^e cycle du primaire* (Mémoire de maîtrise, Université du Québec à Montréal). <https://archipel.uqam.ca/5629/>
- Daneman, M. et Carpenter, P. A. (1980). Individual differences in working memory and reading. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, 19(4), 450-466. [https://doi.org/10.1016/S0022-5371\(80\)90312-6](https://doi.org/10.1016/S0022-5371(80)90312-6)
- Davidson, M. C., Amso, D., Anderson, L. C. et Diamond, A. (2006). Development of cognitive control and executive functions from 4 to 13 years: Evidence from manipulations of memory, inhibition, and task switching. *Neuropsychologia*, 44(11), 2037-2078. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2006.02.006>
- Day, S. B. et Goldstone, R. L. (2012). The import of knowledge export: Connecting findings and theories of transfer of learning. *Educational Psychologist*, 47(3), 153–176. <https://doi.org/10.1080/00461520.2012.696438>
- de Jong, P. F. (2006). Understanding normal and impaired reading development: A working memory perspective. Dans S. J. Pickering (dir), *Working memory and education* (p. 33-60). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-012554465-8/50004-1>
- de Ribaupierre, A. (2016). Les neurosciences cognitives du développement de la mémoire : implications pour les sciences de l'éducation. Dans É. Tardif et P.—A. Doudin (dir.), *Neurosciences et cognition : perspectives pour les sciences de l'éducation* (p. 165-188). De Boeck Supérieur.
- Detterman, D. K. (1993). The case for the prosecution: Transfer as an epiphenomenon. Dans D. K. Detterman et R. J. Sternberg (dir.), *Transfer on trial : Intelligence, cognition, and instruction* (p. 1–24). Ablex Publishing.
- Diamond, A. (2002). Normal development of prefrontal cortex from birth to young adulthood: Cognitive functions, anatomy, and biochemistry. Dans D. T. Stuss et R. T. Knight (dir.), *Principles of frontal lobe function* (p.466-503). Oxford University Press. <http://devcogneuro.com/Publications/ChapterinStuss&Knight.pdf>

- Diamond, A. (2013). Executive functions. *Annual Review of Psychology*, 64, 135-168. <https://doi.org/10.1146/annurev-psych-113011-143750>
- Diamond, A. (2016). Why improving and assessing executive functions. Dans J. A. Griffin, P. McCardle et L. S. Freund (dir.), *Executive function in preschool-age children: Integrating measurement, neurodevelopmental, and translational research* (p. 11-43). American Psychological Association. <https://doi.org/10.1037/14797-002>
- Duncan, G. J., Dowsett, C. J., Claessens, A., Magnuson, K., Huston, A. C., Klebanov, P., Pagani, L., 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>
- Engle, R. W. (2002). Working memory capacity as executive attention. *Current Directions in Psychological Science*, 11(1), 19-23. <https://doi.org/10.1111/1467-8721.00160>
- Engel de Abreu, P. M. J., Abreu, N., Nikaedo, C. C., Puglisi, M. L., Tourinho, C. J., Miranda, M. C., Befi-Lopes, D. M., Bueno, O. F. A. et Martin, R. (2014). Executive functioning and reading achievement in school: A study of Brazilian children assessed by their teachers as “poor readers”. *Frontiers in Psychology*, 5, Article 550. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2014.00550>
- Ericsson, K. A. et Kintsch, W. (1995). Long-term working memory. *Psychological Review*, 102(2), 211-245. <https://doi.org/10.1037/0033-295X.102.2.211>
- Eriksen B. A, Eriksen C. W. (1974). Effects of noise letters upon the identification of a target letter in a nonsearch task. *Perception et Psychophysics*, 16(1), 143–149. <https://doi.org/10.3758/BF03203267>
- Escolano-Pérez, E., Herrero-Nivela, M. L., Blanco-Villaseñor, A. et Anguera, M. T. (2017). Systematic observation: relevance of this approach in preschool executive function assessment and association with later academic skills. *Frontiers in Psychology*, 8, 2031. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2017.02031>
- Espy, K. A., Bull, R., Kaiser, H., Martin, J. et Banet, M. (2008). Methodological and conceptual issues in understanding the development of executive control in the

preschool period. Dans V. Anderson, R. Jacobs et P. J. Anderson (dir.), *Executive functions and the frontal lobes: A lifespan perspective* (p. 105-121). Psychology Press.
https://books.google.co.uk/books?hl=fr&lr=&id=f8p5AgAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA105&dq=espy+bull+kaiser&ots=RjbHzSznQN&sig=ZjB-S09q49HBg8ScxVGDIfVxLH0&redir_esc=y#v=onepage&q=espy%20bull%20kaiser&f=false

Espy, K. A., McDiarmid, M. M., Cwick, 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

Ferguson, H.J., Brunson, V.E.A et Bradford, E.E.F. (2021). The developmental trajectories of executive function from adolescence to old age. *Scientific Reports* 11, 1382. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-80866-1>

Field, A. (2009), *Discovering statistics using SPSS* (3^e éd.), Sage Publications.

Franks, J. J., Bilbrey, C. W., Lien, K. G. et McNamara, T. P. (2000). Transfer-appropriate processing (TAP). *Memory and Cognition*, 28(7), 1140–1151.
<https://doi.org/10.3758/BF03211815>

Frenay, M. (2004). Du transfert des apprentissages au transfert des connaissances. Dans A. Presseau et M. Frenay (dir.), *Le transfert des apprentissages : comprendre pour mieux intervenir* (p. 7-48). Presses de l'Université Laval.
[https://books.google.ca/books?hl=fr&lr=&id=-6QxYr2NzGMC&oi=fnd&pg=PA7&dq=Frenay,+M.,+\(2004\).+Du+transfert+de+s+apprentissages+au+transfert+des+connaissances.+Dans+A.+Presseau+et+M.+Frenay+\(dir.\),+Le+transfert+des+apprentissages+:+comprendre+pour+mieux+intervenir+\(p.+7-48\).+Presses+de+l%E2%80%99Universit%C3%A9+Laval.&ots=QY1vO4QrgE&sig=yhgUht3QJpfQC4Kwk7C2NuLkkVA&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false](https://books.google.ca/books?hl=fr&lr=&id=-6QxYr2NzGMC&oi=fnd&pg=PA7&dq=Frenay,+M.,+(2004).+Du+transfert+de+s+apprentissages+au+transfert+des+connaissances.+Dans+A.+Presseau+et+M.+Frenay+(dir.),+Le+transfert+des+apprentissages+:+comprendre+pour+mieux+intervenir+(p.+7-48).+Presses+de+l%E2%80%99Universit%C3%A9+Laval.&ots=QY1vO4QrgE&sig=yhgUht3QJpfQC4Kwk7C2NuLkkVA&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false)

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. <https://doi.org/10.1037/0096-3445.133.1.101>

- Friedman, N. P., Miyake, A., Young, S. E., DeFries, J. C., Corley, R. P. et Hewitt, J. K. (2008). Individual differences in executive functions are almost entirely genetic in origin. *Journal of Experimental Psychology: General*, 137(2), 201–225. <https://doi.org/10.1037/0096-3445.137.2.201>
- 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>
- Gashaj, V., Oberer, N., Mast, F. W. et Roebers, C. M. (2019). Individual differences in basic numerical skills: The role of executive functions and motor skills. *Journal of Experimental Child Psychology*, 182, 187-195. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2019.01.021>
- Gathercole, S. E. et Pickering, S. J. (2000). Working memory deficits in children with low achievements in the national curriculum at 7 years of age. *British Journal of Educational Psychology*, 70(2), 177-194. <https://doi.org/10.1348/000709900158047>
- Gathercole, S. E., Alloway, T. P., Kirkwood, H. J., Elliott, J. G., Holmes, J. et Hilton, K. A. (2008). Attentional and executive function behaviours in children with poor working memory. *Learning and Individual Differences*, 18(2), 214-223. <https://doi.org/10.1016/j.lindif.2007.10.003>
- Geary, D. C. (2004). Mathematics and learning disabilities. *Journal of Learning Disabilities*, 37(1), 4-15. <https://doi.org/10.1177/00222194040370010201>
- Gentner, D., Rattermann, M. J. et Forbus, K. D. (1993). The roles of similarity in transfer: Separating retrievability from inferential soundness. *Cognitive Psychology*, 25(4), 524-575. <https://doi.org/10.1006/cogp.1993.1013>
- George, J. L. et Greenfield, D. B. (2005). Examination of a structured problem-solving flexibility task for assessing approaches to learning in young children: Relation to teacher ratings and children's achievement. *Journal of Applied Developmental Psychology*, 26(1), 69–84. <https://doi.org/10.1016/j.appdev.2004.10.006>

- Giamellaro, M. (2014). Primary Contextualization of Science Learning through Immersion in Content-Rich Settings. *International Journal of Science Education*, 36(17), 2848-2871. <https://doi.org/10.1080/09500693.2014.937787>
- Gick, M. L. et Holyoak, K. J. (1983). Schema induction and analogical transfer. *Cognitive Psychology*, 15(1), 1-38. [https://doi.org/10.1016/0010-0285\(83\)90002-6](https://doi.org/10.1016/0010-0285(83)90002-6)
- Glass, G. V., McGaw, B. et Smith, T. L. (1981). *Meta-analysis in social research*. Sage Publications.
- Godefroy, O., Cabaret, M., Petit-Chenal, V., Pruvo, J.-P. et Rousseaux, M. (1999). Control functions of the frontal lobes. Modularity of the central-supervisory system? *Cortex*, 35(1), 1-20. [https://doi.org/10.1016/S0010-9452\(08\)70782-2](https://doi.org/10.1016/S0010-9452(08)70782-2)
- Gómez, D. M., Jiménez, A., Bobadilla, R., Reyes, C. et Dartnell, P. (2015). The effect of inhibitory control on general mathematics achievement and fraction comparison in middle school children. *ZDM Mathematics education*, 47, 801-811. <https://doi.org/10.1007/s11858-015-0685-4>
- Grimaud, É., Taconnat, L. et Clarys, D. (2017). Stimulation cognitive chez les adultes âgés: comparaison d'une méthode de stimulation par les activités de loisirs et d'une méthode de stimulation conventionnelle. *Gériatrie et Psychologie Neuropsychiatrie du Vieillessement*, 15(2), 214-223. <https://doi.org/10.1684/pnv.2017.0669>
- Grützmann, R., Kathmann, N., Gutmann, G. et Heinzl, S. (2021). Effects of adaptive and non-adaptive three-week executive control training on interference control: Evidence from the N2, CRN, and ERN. *International Journal of Psychophysiology*, 162, 8-21. <https://doi.org/10.1016/j.ijpsycho.2021.01.011>
- Hackman, D. A., Gallop, R., Evans, G. W. et Farah, M. J. (2015). Socioeconomic status and executive function: Developmental trajectories and mediation. *Developmental Science*, 18(5), 686-702. <https://doi.org/10.1111/desc.12246>
- Hall, P. A. et Fong, G. T. (2015). Temporal self-regulation theory: A neurobiologically informed model for physical activity behavior. *Frontiers in Human Neuroscience*, 9. Article 117. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2015.00117>

- Hallett, P. E. (1978). Primary and secondary saccades to goals defined by instructions. *Vision Research*, 18(10), 1279-1296. [https://doi.org/10.1016/0042-6989\(78\)90218-3](https://doi.org/10.1016/0042-6989(78)90218-3)
- Hampshire, A. et Sharp, D. J. (2015). Contrasting network and modular perspectives on inhibitory control. *Trends in Cognitive Sciences*, 19(8), 445-452. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tics.2015.06.006>
- Harrer, M., Cuijpers, P., Furukawa, T.A. et Ebert, D.D. (2021). *Doing Meta-Analysis with R: A Hands-On Guide*. Chapman & Hall/CRC Press. https://bookdown.org/MathiasHarrer/Doing_Meta_Analysis_in_R/
- Harrison, T. L., Shipstead, Z., Hicks, K. L., Hambrick, D. Z., Redick, T. S. et Engle, R. W. (2013). Working memory training may increase working memory capacity but not fluid intelligence. *Psychological Science*, 24(12), 2409-2419. <https://doi.org/10.1177/0956797613492984>
- Haskell, R. E. (2001). *Transfer of learning: Cognition, instruction and reasoning*. San Diego, Academic press.
- Hattie, J. (2009). *Visible learning: A synthesis of over 800 meta-analyses relating to achievement*. Taylor and Francis Group. <https://ebookcentral.proquest.com/lib/uqam/detail.action?docID=4014319>
- Hebb, D. O. (2002). *The Organization of Behavior: A Neuropsychological Theory* (2^e éd.). Psychology Press. <https://doi.org/10.4324/9781410612403>
- Hedges, L. V. (1981). Distribution theory for Glass's estimator of effect size and related estimators. *Journal of Educational Statistics*, 6(2), 107-128. <https://doi.org/10.3102%2F10769986006002107>
- Hedges, L. V., Tipton, E. et Johnson, M. C. (2010). Robust variance estimation in meta-regression with dependent effect size estimates. *Research Synthesis Methods*, 1(1), 39-65. <http://dx.doi.org/10.1002/jrsm.5>
- Hitch, G. J., Towse, J. N. et Hutton, U. (2001). What limits children's working memory span? Theoretical accounts and applications for scholastic

development. *Journal of Experimental Psychology: General*, 130(2), 184–198.
<http://dx.doi.org/10.1037/0096-3445.130.2.184>

- Hogan, T. P. (2007). *Introduction à la psychométrie* (adapté par R. Stephenson et N. Parent, 2012). Chenelière éducation.
- Holmes, J., Gathercole, S. E. et Dunning, D. L. (2009). Adaptive training leads to sustained enhancement of poor working memory in children. *Developmental Science*, 12(4), F9-F15. <https://doi.org/10.1111/j.1467-7687.2009.00848.x>
- Houdé, O. (2017). *Apprendre à résister* (2^e éd.). Le Pommier.
- Houdé, O. (2018). *Les 100 mots de la psychologie* (2^e éd.). Presses Universitaires de France. <https://doi.org/10.3917/puf.houde.2018.01>
- Ito, T. A., Friedman, N. P., Bartholow, B. D., Correll, J., Loersch, C., Altamirano, L. J. et Miyake, A. (2015). Toward a comprehensive understanding of executive cognitive function in implicit racial bias. *Journal of Personality and Social Psychology*, 108(2), 187–218. <https://doi.org/10.1037/a0038557>
- Jacobson, L. A., Koriakin, T., Lipkin, P., Boada, R., Frijters, J. C., Lovett, M. W., Hill, D., Willcutt, E., Gottwald, S., Wolf, M., Bosson-Heenan, J., Gruen, J. R. et Mahone, E. M. (2017). Executive functions contribute uniquely to reading competence in minority youth. *Journal of Learning Disabilities*, 50(4), 422-433. <https://doi.org/10.1177/0022219415618501>
- Jaeggi, S. M., Buschkuhl, M., Jonides, J. et Perrig, W. J. (2008). Improving fluid intelligence with training on working memory. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 105(19), 6829-6833. <https://doi.org/10.1073/pnas.0801268105>
- Juhel, J. (1999). Méthodes d'étude des différences individuelles. Dans J.-P. Rossi (dir.), *Les méthodes de recherche en psychologie* (p.197-234). Dunod.
- Kable, J. W., Caulfield, M. K., Falcone, M., McConnell, M., Bernardo, L., Parthasarathi, T., Cooper, N., Ashare, R., Audrain-McGovern, J., Hornik, R., Diefenbach, P., Lee, F. J. et Lerman, C. (2017). No effect of commercial cognitive training on brain activity, choice behavior, or cognitive performance.

Journal of Neuroscience, 37(31), 7390-7402.
<https://doi.org/10.1523/jneurosci.2832-16.2017>

- Kane, M. J., Conway, A. R. A., Miura, T. K. et Colflesh, G. J. H. (2007). Working memory, attention control, and the n-back task: A question of construct validity. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 33(3), 615–622. <https://doi.org/10.1037/0278-7393.33.3.615>
- 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>
- Kassai, R., Futo, J., Demetrovics, Z. et Takacs, Z. K. (2019). A meta-analysis of the experimental evidence on the near- and far-transfer effects among children's executive function skills. *Psychological Bulletin*, 145(2), 165-188. <https://doi.org/10.1037/bul0000180>
- Kegel, C. A. et Bus, A. G. (2013). Links between DRD4, executive attention, and alphabetic skills in a nonclinical sample. *Journal of Child Psychology and Psychiatry*, 54(3), 305-312. <https://doi.org/10.1111/j.1469-7610.2012.02604.x>
- Klingberg, T., Fernell, E., Olesen, P. J., Johnson, M., Gustafsson, P., Dahlström, K., Gillberg, C. G., Forssberg, H. et Westerberg, H. (2005). Computerized training of working memory in children with ADHD—A randomized, controlled trial. *Journal of the American Academy of Child and Adolescent Psychiatry*, 44(2), 177-186. <https://doi.org/10.1097/00004583-200502000-00010>
- Kornell, N. (2009). Optimising learning using flashcards: Spacing is more effective than cramming. *Applied Cognitive Psychology*, 23(9), 1297-1317. <https://doi.org/10.1002/acp.1537>
- Korpipää, H., Niemi, P., Aunola, K., Koponen, T., Hannula-Sormunen, M., Stolt, S., Aro, M., Nurmi, J.-E. et Rautava, P. (2019). Prematurity and overlap between reading and arithmetic: The cognitive mechanisms behind the association. *Contemporary Educational Psychology*, 56, 171-179. <https://doi.org/10.1016/j.cedpsych.2019.01.005>

- Kroesbergen, E. H., Van Luit, J. E. H., Van Lieshout, E. C. D. M., Van Loosbroek, E. et Van de Rijt, B. A. M. (2009). Individual differences in early numeracy: The role of executive functions and subitizing. *Journal of Psychoeducational Assessment*, 27(3), 226-236. <https://doi.org/10.1177/0734282908330586>
- Lakes, K. D. et Hoyt, W. T. (2004). Promoting self-regulation through school-based martial arts training. *Journal of Applied Developmental Psychology*, 25(3), 283-302. <https://doi.org/10.1016/j.appdev.2004.04.002>
- Landerl, K. et Wimmer, H. (2008). Development of word reading fluency and spelling in a consistent orthography: An 8-year follow-up. *Journal of Educational Psychology*, 100(1), 150. <https://doi.org/10.1037/0022-0663.100.1.150>
- Latzman, R. D., Elkovitch, N., Young, J. et Clark, L. A. (2010). The contribution of executive functioning to academic achievement among male adolescents. *Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology*, 32(5), 455–462. <https://doi.org/10.1080/13803390903164363>
- Lee, K. et Bull, R. (2016). Developmental changes in working memory, updating, and math achievement. *Journal of Educational Psychology*, 108(6), 869-882. <https://doi.org/10.1037/edu0000090>
- Legendre, R. (2005). Transfert d'apprentissage. Dans R. Legendre (dir.), *Dictionnaire actuel de l'éducation* (3^e éd., p. 1402). Guérin.
- Lehto, J. (1996). Are executive function tests dependent on working memory capacity? *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 49A(1), 29–50. <https://doi.org/10.1080%2F713755616>
- Lehto, J. E., Juujärvi, P., Kooistra, L. et Pulkkinen, L. (2003). Dimensions of executive functioning: Evidence from children. *British Journal of Developmental Psychology*, 21(1), 59–80. <https://doi.org/10.1348/026151003321164627>
- Lightbown, P. M. (2008). Transfer appropriate processing as a model for classroom second language acquisition. Dans Z. Han (dir.), *Understanding second language process* (p. 27–44). Multilingual Matters. <https://doi.org/10.21832/9781847690159-005>

- Littell, J. H., Corcoran, J. et Pillai, V. (2008). *Systematic reviews and meta-analysis*. Oxford University Press.
https://books.google.ca/books?hl=fr&lr=&id=UpsRDAAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR5&dq=littell&ots=VhU47oqohd&sig=hMBn-BfeJ_DEFTmEyki6SWfA&redir_esc=y#v=onepage&q=littell&f=false
- Lobato, J. (2006). Alternative perspectives on the transfer of learning: History, issues, and challenges for future research. *The Journal of the Learning Sciences*, 15(4), 431–449. https://doi.org/10.1207/s15327809jls1504_1
- Lockhart, R. S., Lamon, M. et Gick, M. L. (1988). Conceptual transfer in simple insight problems. *Memory and Cognition*, 16(1), 36–44.
<https://doi.org/10.3758/BF03197743>
- Logan, G. D. (1994). On the ability to inhibit thought and action: A users' guide to the stop signal paradigm. Dans D. Dagenbach et T. H. Carr (dir.), *Inhibitory processes in attention, memory, and language* (p. 189–239). Academic Press.
- Loosli, S. V., Buschkuehl, M., Perrig, W. J. et Jaeggi, S. M. (2012). Working memory training improves reading processes in typically developing children. *Child Neuropsychology*, 18(1), 62-78.
<https://doi.org/10.1080/09297049.2011.575772>
- Mackey, A. P., Hill, S. S., Stone, S. I. et Bunge, S. A. (2011). Differential effects of reasoning and speed training in children. *Developmental Science*, 14(3), 582-590. <https://doi.org/10.1111/j.1467-7687.2010.01005.x>
- MacLeod, C. M., Dodd, M. D., Sheard, E. D., Wilson, D. E. et Bibi, U. (2003). In opposition to inhibition. Dans B. H. Ross (dir.), *The psychology of learning and motivation: Advances in research and theory*, (vol. 43, p. 163–214). Elsevier Science.
- Magalhães, S., Carneiro, L., Limpo, T. et Filipe, M. (2020). Executive functions predict literacy and mathematics achievements: The unique contribution of cognitive flexibility in grades 2, 4, and 6. *Child Neuropsychology*, 26(7), 934-952. <https://doi.org/10.1080/09297049.2020.1740188>

- Masson, S., Potvin, P., Riopel, M. et Brault Foisy, L.-M. (2014). Differences in brain activation between novices and experts in science during a task involving a common misconception in electricity. *Mind, Brain and Education*, 8(1), 44-55. <https://doi.org/10.1111/mbe.12043>
- Mayer, R. E., Griffith, E., Jurkowitz, I. T. N. et Rothman, D. (2008). Increased interestingness of extraneous details in a multimedia science presentation leads to decreased learning. *Journal of Experimental Psychology: Applied*, 14(4), 329–339. <https://doi.org/10.1037/a0013835>
- McDonald, J.H. 2014. *Handbook of Biological Statistics* (3^e éd.). Sparky House Publishing.
- McGee, R., Prior, M., Williams, S., Smart, D. et Sanson, A. (2002). The long-term significance of teacher-rated hyperactivity and reading ability in childhood: Findings from two longitudinal studies. *Journal of Child Psychology and Psychiatry*, 43(8), 1004–1017. <https://doi.org/10.1111/1469-7610.00228>
- Melby-Lervåg, M. et Hulme, C. (2013). Is working memory training effective? A meta-analytic review. *Developmental Psychology*, 49(2), 270. <https://doi.org/10.1037/a0028228>
- Miller, G. A. (1956). The magical number seven, plus or minus two: Some limits on our capacity for processing information. *Psychological Review*, 63(2), 81-97. <https://doi.org/10.1037/0033-295X.101.2.343>
- Miller, G. A., Galanter, E. et Pribram, K. H. (1960). *Plans and the Structure of Behavior*. Henry Holt and Co. <https://doi.org/10.1037/10039-000>
- Milner B. (1964). Some effects of frontal lobectomy in man. Dans J. M. Warren et K. Akert, *The Frontal Granular Cortex and Behavior* (p. 313–334). McGraw-Hill.
- Mischel, W., Shoda, Y., et Rodriguez, M. I. (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. et Shah, P. (1999). *Models of working memory: Mechanisms of active maintenance and executive control* (2^e éd.). Cambridge University Press.
- Moher, D., Liberati, A., Tetzlaff, J. et Altman, D. G. (2009). Preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses: The PRISMA statement. *Annals of Internal Medicine*, 151(4), 264-269.
<https://doi.org/10.1371/journal.pmed.1000097>
- Monette, S. et Bigras, M. (2008). La mesure des fonctions exécutives chez les enfants d'âge préscolaire. *Canadian Psychology/Psychologie canadienne*, 49(4), 323-341. <https://doi.org/10.1037/a0014000>
- Monette, S., Bigras, M. et Guay, M. C. (2011). The role of the executive functions in school achievement at the end of Grade 1. *Journal of Experimental Child Psychology*, 109(2), 158-173. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2011.01.008>
- Morgan, P. L., Farkas, G., Hillemeier, M. M., Pun, W. H. et Maczuga, S. (2019). Kindergarten children's executive functions predict their second-grade academic achievement and behavior. *Child Development*, 90(5), 1802-1816.
<https://doi.org/10.1111/cdev.13095>
- Moulden, D. J. A., Picton, T. W., Meiran, N., Stuss, D. T., Riera, J. J. et Valdes-Sosa, P. (1998). Event-related potentials when switching attention between task-sets. *Brain and Cognition*, 37(1), 186-190. <https://psycnet.apa.org/record/1998-04889-058>
- Munakata, Y., Herd, S. A., Chatham, C. H., Depue, B. E., Banich, M. T. et O'Reilly, R. C. (2011). A unified framework for inhibitory control. *Trends in Cognitive Sciences*, 15(10), 453-459. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2011.07.011>
- 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 (dir.), *International handbook of research on conceptual change* (p. 583-618). Routledge.

- Normandeau, S. et Guay, F. (1998). Preschool behavior and first-grade school achievement: The mediational role of cognitive self-control. *Journal of Educational Psychology*, 90(1), 111-121. <https://doi.org/10.1037/0022-0663.90.1.111>
- Nguyen, T. et Duncan, G. J. (2017). Kindergarten components of executive function and third grade achievement: A national study. *Early Childhood Research Quarterly*, 46(1), 49-61. <https://doi.org.proxy.bibliotheques.uqam.ca/10.1016/j.ecresq.2018.05.006>
- Peng, P., Barnes, M., Wang, C., Wang, W., Li, S., Swanson, H. L., Dardick, W. et Tao, S. (2018). A meta-analysis on the relation between reading and working memory. *Psychological Bulletin*, 144(1), 48-76. <https://doi.org/10.1037/bul0000124>
- Peng, P., Congying, S., Beilei, L. et Sha, T. (2012). Phonological Storage and Executive Function Deficits in Children with Mathematics Difficulties. *Journal of Experimental Child Psychology*, 112(4), 452-466. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.jecp.2012.04.004>
- Perkins, D. N. et Salomon, G. (1992). Transfer of learning. Dans T. Husén et T. N. Postlethwaite (dir.), *International encyclopedia of education* (2^e éd., vol. 11, p. 6452-6464). Pergamon press.
- Posner, M. I. et DiGirolamo, G. J. (1998). Executive attention: Conflict, target detection, and cognitive control. Dans R. Parasuraman (dir.), *The attentive brain* (p. 401-423). MIT Press. https://www.researchgate.net/profile/Michael-Posner-2/publication/232582595_Executive_attention_Conflict_target_detection_and_cognitive_control/links/565ddb7a08aeafc2aac8a40f/Executive-attention-Conflict-target-detection-and-cognitive-control.pdf
- Potvin, P., Masson, S., Lafortune, S. et Cyr, G. (2015). Persistence of the intuitive conception that heavier objects sink more: A reaction time study with different levels of interference. *International Journal of Science and Mathematics Education*, 13(1), 21-43. <https://doi.org/10.1007/s10763-014-9520-6>
- Preßler, A.-L., Krajewski, K. et Hasselhorn, M. (2013). Working memory capacity in preschool children contributes to the acquisition of school relevant precursor

skills. *Learning and Individual Differences*, 23, 138–144.
<https://doi.org/10.1016/j.lindif.2012.10.005>

Pustejovsky, J. E. et Tipton, E. (2022). Meta-analysis with robust variance estimation: Expanding the range of working models. *Prevention Science*, 23(3), 425-438. <https://doi.org/10.1007/s11121-021-01246-3>

R Core Team (2021). *R: A language and environment for statistical computing* [logiciel]. R Foundation for Statistical Computing. <http://www.R-project.org/>

Rabbitt, P. (1997). Introduction: Methodologies and models in the study of executive function. Dans P. Rabbitt (dir.), *Methodology of frontal and executive function* (p. 1–38). Routledge.

Raghubar, K. P., Barnes, M. A. et Hecht, S. A. (2010). Working memory and mathematics: A review of developmental, individual difference, and cognitive approaches. *Learning and Individual Differences*, 20(2), 110-122.
<https://doi.org/10.1016/j.lindif.2009.10.005>

Rasch, B. et Born, J. (2013). About sleep's role in memory. *Physiological Reviews*, 93(2), 681-766. <https://doi.org/10.1152/physrev.00032.2012>

Raver, C. C., Jones, S. M., Li-Grining, C., Zhai, F., Bub, K. et Pressler, E. (2011). CSRP's impact on low-income preschoolers' preacademic skills: Self-regulation as a mediating mechanism. *Child Development*, 82(1), 362-378.
<https://doi.org/10.1111/j.1467-8624.2010.01561.x>

Raynal, F. et Rieunier, A. (2014). Mémoire de travail. Dans P. Meirieu (dir.), *Pédagogie, dictionnaire des concepts clés : apprentissages, formation, psychologie cognitive* (10^e éd., p. 317-318). ESF éditeur.

Redick, T. S., Shipstead, Z., Harrison, T. L., Hicks, K. L., Fried, D. E., Hambrick, D. Z., Kane, M. J. et Engle, R. W. (2013). No evidence of intelligence improvement after working memory training: A randomized, placebo-controlled study. *Journal of Experimental Psychology: General*, 142(2), 359.
<https://doi.org/10.1037/a0029082>

- Roell, 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>
- Ross, B. H. (1989). Distinguishing types of superficial similarities: Different effects on the access and use of earlier problems. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, Cognition*, 15(3), 456–468. <https://doi.org/10.1037/0278-7393.15.3.456>
- 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/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>
- Sala, G. et Gobet, F. (2017). Working memory training in typically developing children: A meta-analysis of the available evidence. *Developmental Psychology*, 53(4), 671-685. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1037/dev0000265>
- Senn, T. E., Espy, K. A. et Kaufmann, P. M. (2004). Using path analysis to understand executive function organization in preschool children. *Developmental Neuropsychology*, 26(1). https://doi.org/10.1207/s15326942dn2601_5
- Shalev, L., Tsal, Y. et Mevorach, C. (2007). Computerized progressive attentional training (CPAT) program: Effective direct intervention for children with ADHD. *Child Neuropsychology*, 13(4), 382-388. <https://doi.org/10.1080/09297040600770787>
- Sikora, D. M., Haley, P., Edwards, J. et Butler, R. W. (2002). Tower of London test performance in children with poor arithmetic skills. *Developmental Neuropsychology*, 21(3), 243-254. https://doi.org/10.1207/S15326942DN2103_2

- Simanowski, S. et Krajewski, K. (2019). Specific preschool executive functions predict unique aspects of mathematics development: A 3-year longitudinal study. *Child Development*, 90(2), 544-561. <https://doi.org/10.1111/cdev.12909>
- Simon, J. R. et Rudell, A. P. (1967). Auditory SR compatibility: the effect of an irrelevant cue on information processing. *Journal of Applied Psychology*, 51(3), 300. <https://doi.org/10.1037/h0020586>
- Singley, M. K. et Anderson, J. R. (1989). *The transfer of cognitive skill*. Harvard University Press.
- Siquara, G. M., dos Santos Lima, C. et Abreu, N. (2018). Working memory and intelligence quotient: Which best predicts on school achievement?. *Psico*, 49(4), 365-374. <https://doi.org/10.15448/1980-8623.2018.4.27943>
- Smith, E. E. et Jonides, J. (1999). Storage and executive processes in the frontal lobes. *Science*, 283(5408), 1657-1661. <https://doi.org/10.1126/science.283.5408.1657>
- Son, J. Y., Dumas, L. A. A. et Goldstone, R. L. (2010). When do words promote analogical transfer? *The Journal of Problem Solving*, 3(1), 52–92. <https://doi.org/10.7771/1932-6246.1079>
- Soveri, A., Antfolk, J., Karlsson, L., Salo, B. et Laine, M. (2017). Working memory training revisited: A multi-level meta-analysis of n-back training studies. *Psychonomic Bulletin and Review*, 24(4), 1077-1096. <https://doi.org/10.3758/s13423-016-1217-0>
- Spencer, R. M. et Weisberg, R. W. (1986). Context-dependent effects on analogical transfer. *Memory and Cognition*, 14(5), 442–449. <https://doi.org/10.3758/BF03197019>
- 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>

- Stad, F. E., Van Heijningen, C. J., Wiedl, K. H. et Resing, W. C. (2018). Predicting school achievement: Differential effects of dynamic testing measures and cognitive flexibility for math performance. *Learning and Individual Differences*, 67, 117-125. <https://doi.org/10.1016/j.lindif.2018.07.006>
- Sternberg, R. J., et Frensch, P. A. (1993). Mechanisms of transfer. Dans D. K. Detterman et R. J. Sternberg (dir.), *Transfer on trial : Intelligence, cognition, and instruction* (p. 25–38). Ablex Publishing.
- Stipek, D. et Valentino, R. A. (2015). Early childhood memory and attention as predictors of academic growth trajectories. *Journal of Educational Psychology*, 107(3), 771. <https://doi.org/10.1037/edu0000004>
- 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>
- Stuss, D. T. et Alexander, M. P. (2007). Is there a dysexecutive syndrome? *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 362(1481), 901–915. <https://doi.org/10.1098/rstb.2007.2096>
- Sulik, M. J., Haft, S. L. et Obradović, J. (2018). Visual-motor integration, executive functions, and academic achievement: Concurrent and longitudinal relations in late elementary school. *Early Education and Development*, 29(7), 956-970. <https://doi.org/10.1080/10409289.2018.1442097>
- Swanson, H. L. et Beebe-Frankenberger, M. (2004). The relationship between working memory and mathematical problem solving in children at risk and not at risk for serious math difficulties. *Journal of Educational Psychology*, 96(3), 471–491. <https://doi.org/10.1037/0022-0663.96.3.471>
- Swanson, H. L., Jeng, X. et Jerman, O. (2009). Working memory, short-term memory, and reading disabilities: A selective meta-analysis of the literature. *Journal of Learning Disabilities*, 42(3), 260-287. <https://doi.org/10.1177/0022219409331958>
- Sweller, J. (1994). Cognitive load theory, learning difficulty, and instructional design. *Learning and Instruction*, 4(4), 295-312. [https://doi.org/10.1016/0959-4752\(94\)90003-5](https://doi.org/10.1016/0959-4752(94)90003-5)

- Sweller, J., van Merriënboer, J. J. G. et Paas, F. (2019). Cognitive architecture and instructional design: 20years later. *Educational Psychology Review*, 21(2). <https://doi.org/10.1007/s10648-019-09465-5>
- Szucs, D., Devine, A., Soltesz, F., Nobes, A. et Gabriel, F. (2013). Developmental dyscalculia is related to visuo-spatial memory and inhibition impairment. *Cortex*, 49(10), 2674-2688. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2013.06.007>
- Tabachnick, B. G., Fidell, L. S. et Ullman, J. B. (2019). *Using multivariate statistics* (7^e éd.). Pearson.
- Takacs, Z. K. et Kassai, R. (2019). The efficacy of different interventions to foster children's executive function skills: A series of meta-analyses. *Psychological Bulletin*, 145(7), 653-697. <https://doi.org/10.1037/bul0000195>
- Taktek, K. (2017). L'apprenant au cœur du transfert des apprentissages : perspectives d'interventions pédagogiques dans le domaine de l'éducation. *Canadian Journal of Education*, 40(4), 514–542. <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=eue&AN=128324511&lang=fr&site=ehost-live>
- Thalheimer, W. et Cook, S. (2002). How to calculate effect sizes from published research: A simplified methodology. *Work-Learning Research*, 1(9).
- Thorell, L. B., Lindqvist, S., Bergman Nutley, S., Bohlin, G. et Klingberg, T. (2009). Training and transfer effects of executive functions in preschool children. *Developmental Science*, 12(1), 106–113. <https://doi.org/10.1111/j.1467-7687.2008.00745.x>
- Thorndike, E. L. (1923). The Influence of first-year latin upon ability to read english. *School and Society*, 17, 165–168.
- Thorndike, E. L. et Woodworth, R. S. (1901). The influence of improvement in one mental function upon the efficiency of other functions. II. The estimation of magnitudes. *Psychological Review*, 8(4), 384–395. <https://doi.org/10.1037/h0071280>

- Tipton, E. (2014). Small sample adjustments for robust variance estimation with meta-regression. *Psychological methods*, 20(3), 375-393. <https://doi.org/10.1037/met0000011>
- Titz, C. et Karbach, J. (2014). Working memory and executive functions: Effects of training on academic achievement. *Psychological Research*, 78(6), 852-868. <https://doi.org/10.1007/s00426-013-0537-1>
- Valian, V. (2015). Bilingualism and cognition. *Bilingualism: Language and Cognition*, 18(1), 3–24. <https://doi.org/10.1017/S1366728914000522>
- van der Sluis, S., de Jong, P. F. et van der Leij, A. (2007). Executive functioning in children, and its relations with reasoning, reading, and arithmetic. *Intelligence*, 35(5), 427-449. <https://doi.org/10.1016/j.intell.2006.09.001>
- 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>
- Viterbori, P., Usai, M. C., Traverso, L. et De Franchis, V. (2015). How preschool executive functioning predicts several aspects of math achievement in Grades 1 and 3: A longitudinal study. *Journal of Experimental Child Psychology*, 140, 38-55. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2015.06.014>
- Walfish, S. (2006). A review of statistical outlier methods. *Pharmaceutical technology*, 30(11), 82.
- Wang, S. et Gathercole, S. E. (2013). Working memory deficits in children with reading difficulties: Memory span and dual task coordination. *Journal of Experimental Child Psychology*, 115(1), 188-197. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2012.11.015>
- Ward, J. (2010). *The students guide to cognitive neuroscience* (2^e éd.). Psychology Press.

- Wiebe, S. A., Espy, K. A. et Charak, D. (2008). Using confirmatory factor analysis to understand executive control in preschool children: I. Latent structure. *Developmental Psychology*, 44, 575–587. <https://doi.org/10.1037/0012-1649.44.2.575>
- Wilkey, E. D., Pollack, C. et Price, G. R. (2018). Dyscalculia and typical math achievement are associated with individual differences in number-specific executive function. *Child Development*, 91(2), 596-619. <https://doi.org/10.1111/cdev.13194>
- Willcutt, E. G., Petrill, S. A., Wu, S., Boada, R., DeFries, J. C., Olson, R. K. et Pennington, B. F. (2013). Comorbidity between reading disability and math disability: Concurrent psychopathology, functional impairment, and neuropsychological functioning. *Journal of Learning Disabilities*, 46(6), 500-516. <https://doi.org/10.1177/0022219413477476>
- Willoughby, M. T., Kupersmidt, J. B. et Voegler-Lee, M. E. (2012). Is preschool executive function causally related to academic achievement? *Child Neuropsychology*, 18(1), 79–91. <https://doi.org/10.1080/09297049.2011.578572>
- Wright, 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>
- Yeniad, N., Malda, M., Mesman, J., van IJzendoorn, M. H. et Pieper, S. (2013). Shifting ability predicts math and reading performance in children: A meta-analytical study. *Learning and Individual Differences*, 23(1), 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.lindif.2012.10.004>
- Zelazo, P. D., Frye, D. et Rapus, T. (1996). An age-related dissociation between knowing rules and using them. *Cognitive Development*, 11(1), 37-63. [https://doi.org/10.1016/S0885-2014\(96\)90027-1](https://doi.org/10.1016/S0885-2014(96)90027-1)
- Zhao, X., Chen, L. et Maes, J. H. R. (2016). Training and transfer effects of response inhibition training in children and adults. *Developmental Science*, 21(1), Article 12511. <https://doi.org/10.1111/desc.12511>