UNIVERSITÉ DE PARIS, Institut de Psychologie

École Doctorale 261 « Cognition, Comportements, Conduites Humaines »

Laboratoire de Psychologie du Développement et de l'Éducation de l'enfant (LaPsyDÉ), UMR CNRS 8240

Allers-retours du labo à la classe : Faire de la recherche participative sur le contrôle inhibiteur via la plateforme numérique Lea.fr

Marie LÉTANG

Thèse de Doctorat de Psychologie

Dirigée par le Pr. Olivier HOUDÉ

Présentée et soutenue publiquement le 11 Juin 2021

Devant un jury composé de :

BORST Grégoire, Professeur à Université de Paris – Examinateur
CITRON Pascaline, Directrice de Nathan Pédagogie – Membre invité du jury
GARDES Marie-Line, Professeure ordinaire à HEP du Canton de Vaud – Examinatrice
GUILLERY-GIRARD Bérangère, Maître de Conférences à École Pratique des Hautes Études – Examinatrice
HOUDÉ Olivier, Professeur à Université de Paris – Directeur de la thèse
SANDER Emmanuel, Professeur Ordinaire à Université de Genève – Rapporteur
THEVENOT Catherine, Professeure à Université de Lausanne – Rapportrice

Remerciements

En premier lieu, je remercie les membres de mon jury de thèse, Grégoire Borst, Marie-Line Gardes, Bérangère Guillery-Girard, Emmanuel Sander et Catherine Thevenot, qui ont accepté d'apporter leur expertise sur ce travail, et qui me font l'honneur d'être présents lors de ma soutenance.

Je remercie Olivier Houdé, mon directeur de thèse, de m'avoir accordé sa confiance alors même que nos chemins ne s'étaient pas encore croisés. Très souvent intimidée en passant la porte de votre bureau, j'en suis toujours ressortie confiante et déterminée à accomplir nos différents projets, qu'ils concernent cette thèse, mais aussi l'après-thèse que nous préparons maintenant depuis plusieurs mois.

Je remercie Grégoire, directeur du laboratoire, mais aussi directeur de mes mémoires de Master, de me faire confiance depuis bientôt 6 ans, et de m'avoir permis d'obtenir ce magnifique sujet de thèse. J'ai beaucoup appris à tes côtés et je sais par avance que j'apprendrai encore beaucoup de toi dans la réalisation de nos futurs projets.

Je remercie Pascaline de m'avoir accueillie dans son équipe et d'avoir cru en ce pari fou de faire de la recherche expérimentale au sein de son département. Malgré les différences entre le monde de la recherche et de l'entreprise, tu as toujours été à mon écoute pour trouver, ensemble, une solution à chacune de nos difficultés.

Je remercie Catherine Lucet et Marianne Durand d'avoir fait une place au sein de Nathan pour une doctorante, malgré votre première expérience laborieuse, jusqu'à envisager aujourd'hui la création d'un poste de docteure au sein de votre équipe.

Je remercie l'ensemble des membres titulaires du laboratoire pour votre bonne humeur chaque vendredi où nous pouvions encore nous réunir.

Je remercie Sandrine Rossi, qui m'a encadrée lors de ma Licence à Caen, m'a incitée à postuler au Master de Paris Descartes, et qui surtout, m'a donné le goût de la recherche.

Je remercie les doctorants et post-doctorants du laboratoire pour nos échanges, rarement très scientifiques, et plus particulièrement ceux arrivés en même temps que moi. Matthieu, merci pour tes blagues qu'il me fallait parfois un peu de temps avant de comprendre. Manali,

merci pour cette balade nocturne entre New-York et… l'état de New-York. Et Joy, merci pour ta bonne humeur, tes mots réconfortants et ta TCC aux souris totalement inefficace.

Je remercie également la Dream Team, comme l'appelait Mathilde, l'équipe de Lea.fr. Chouchou, merci pour tes encouragements permanents. Stéphanie, merci pour la rencontre avec ton beau-frère qui ne m'aura finalement pas permis d'intégrer la famille. Cindy, merci pour ces déjeuners en tête à tête qui permettaient de souffler. Virginie, merci de me soutenir dans les expressions et la culture du Grand-Ouest. Aurore, merci de toujours trouver la petite touche positive. Valérie, merci de m'avoir permis de faire mes innombrables envois postaux. Bérénice, merci d'avoir toujours la phrase pour rire. Merci également à Mathilde, Manon et Camille avec qui j'aurais aimé pouvoir travailler plus longtemps.

Je remercie l'équipe de Nathan Maternelle de m'avoir intégrée à leur espace les deux premières années de ma thèse (et plus particulièrement à Fatiha qui a été mon binôme). Ça a également été un plaisir de travailler avec vous pour la création des jeux Flexigame.

Je remercie Julien d'avoir participé à l'ensemble des expérimentations de cette thèse, et d'avoir assuré la traduction chercheurs – enseignants.

Je remercie l'ensemble des directeurs d'école, enseignants, parents d'élève et élèves parisiens de m'avoir fait confiance tout au long de mes expérimentations et de toujours m'avoir chaleureusement accueillie dans leurs classes.

Je remercie sincèrement les plus de 250 enseignants de Lea.fr qui ont participé à mes recherches et qui m'ont beaucoup appris. Merci également à vos élèves qui ont accepté de se prêter au jeu de la recherche, et à leurs parents de les y avoir autorisés.

Je remercie « The reflex des boules » de m'avoir donné l'envie de suivre mes cours de Master. Cati, merci pour tes images, toujours plus ignobles les unes que les autres. Emmanuelle, merci pour tous ces litres de vins et les prochains qu'il nous reste à partager. Merci également pour tes traductions, parfois pour la thèse, mais plus souvent pour me traduire les sérénades de Justin Bieber. Justine, merci pour ces deux belles années dans notre palace de Boulogne qui m'ont beaucoup apporté, et notamment Les Dimanchistes.

Je remercie le Trio Infernal. Le nom a évolué mais vous comprendrez que je ne puisse le citer dès les premières pages de ma thèse. Lulu, merci pour le Cyrano de Bergerac qu'on aurait dû remplacer beaucoup plus tôt et tes coachings RH qui porteront leurs fruits je l'espère.

Marjo, merci de m'accompagner depuis bientôt 12 ans et de me faire toujours autant rire. Où que tu sois, ton nez gardera toujours sa place particulière.

Je remercie mes parents et mon frère de m'avoir permis d'en arriver si loin et de toujours m'avoir soutenue. Maman, merci d'avoir toujours les mots pour me rassurer et me réconforter. Papa, merci de ne t'être jamais satisfait d'un 20/20. Merci à vous deux de m'avoir accueillie dans votre bois (moins 5 ares) pour les derniers jours d'écriture et de correction de cette thèse. Benjamin, merci d'être le grand frère que tu es, qui voudra toujours que sa petite sœur vise trois marches au-dessus de ce qu'elle se sent capable de faire.

Pour finir, je souhaite remercier Audrey et Benjamin dont le rôle principal, ces derniers mois, a été de me faire oublier que j'avais une thèse à écrire. Vous avez excellé ! Benj, merci de m'avoir soutenue ces derniers mois. Je te promets que les prochaines années seront plus douces. Audrey de Cat première du nom, merci de m'avoir fait ranger mes chaussures et de m'accompagner chaque jour même si je ne tasse pas les poubelles. Tu es comme ma première sœur.

« Il n'y a pas de problème, il n'y a que des solutions. »

André Gide

Table des matières

PRÉSENTATION GÉNÉRALE DE LA THÈSE..... 11

INTRODUCTION THÉORIQUE..... 16

Chapitre 1 : Le développement cognitif de l'enfant..... 17

I. Les modèles du développement..... 18

1. Le développement cognitif de l'enfant selon Piaget..... 18

2. Les limites du modèle piagétien..... 19

3. Un développement dynamique et non linéaire..... 21

II. Les fonctions exécutives au cœur du développement..... 24

1. Le contrôle inhibiteur..... 25

2. La mémoire de travail..... 28

3. La flexibilité cognitive..... 30

III. Conclusion..... 32

Chapitre 2 : Le contrôle inhibiteur à l'école..... 33

I. Le rôle du contrôle inhibiteur dans les acquisitions scolaires..... 34

1. Lire et écrire..... 35

2. Compter..... 40

3. Penser ou raisonner..... 44

4. Respecter autrui et « vivre ensemble »..... 47

II. Entrainer le contrôle inhibiteur des élèves..... 49

1. Les points clés d'un entrainement..... 49

2. Les effets de transfert proche et lointain..... 51

3. La stabilité temporelle d'un entrainement..... 53

4. Les différentes approches d'un entrainement..... 53

5. Les différents formats d'un entrainement..... 55

III. Conclusion..... 58

Chapitre 3 : Passer du laboratoire à la classe 59
I. Faire de la recherche participative 60
1. Qu'est-ce que la recherche participative ? 60
2. Les étapes de mise en place d'une recherche participative 61
3. Les différentes formes de recherche participative 65
4. Exemples de recherches participatives dans différents domaines scientifiques 67
II. Le cadre de cette thèse 69
1. Le financement de la thèse 69
2. Lea.fr, le réseau numérique, pédagogique et collaboratif des Editions Nathan 70
2.1. L'histoire des Editions Nathan 70
2.2. Les débuts de Lea.fr 72
2.3. Lea.fr aujourd'hui 73
3. La collaboration entre Lea.fr et le LaPsyDÉ : allers-retours du labo à la classe 74
3.1. Les enjeux de cette collaboration 74
3.2. Comment passer du laboratoire à la classe 76
III. Conclusion 78
CONTRIBUTIONS EXPÉRIMENTALES 80
Etude 1 : Du laboratoire à la classe : entrainer le contrôle inhibiteur d'enfants d'âge scolaire par le biais d'une recherche participative avec des enseignants 88
Introduction 89
Méthode 92
Participants 92
Matériel et procédure 93
Sessions de pré-test et le post-test 93
Sessions d'entrainement 94
Résultats 95
Discussion 96

Etude 2 : Repérer et évaluer les heuristiques en classe des enfants d'âge scolaire par le biais d'une recherche participative menée par des enseignants. 101

Introduction 102

Méthode 106

Participants 106

Matériel et procédure 108

La comparaison de nombres décimaux 108

La comparaison de fractions 109

La multiplication par 10 109

La soustraction avec retenue 109

Les accords après les et vous 110

Les accords en nombre 110

Le chiffre des unités 111

Les problèmes arithmétiques à contenus verbaux 111

Résultats 111

La comparaison de nombres décimaux 112

La comparaison de fractions 114

La multiplication par 10 115

La soustraction avec retenue 116

Les accords après les et vous 120

Les accords en nombre 121

Le chiffre des unités 123

Les problèmes arithmétiques à contenus verbaux 124

Discussion 126

Etude 3 : Apprendre à inhiber une heuristique trompeuse pour surmonter les difficultés dans la résolution de problèmes arithmétiques à contenus verbaux : Convergence de résultats obtenus au laboratoire et en recherche participative 131
Introduction 132
Expérimentation 1 137
Méthode 137
Participants 137
Matériel 137
Evaluations : pré-test, post-test immédiat et post-test différé 137
L'intervention exécutive 138
L'intervention contrôle active 139
Procédure 140
Résultats 140
Discussion 144
Expérimentation 2 145
Méthode 146
Participants 146
Matériel et procédure 147
Résultats 147
Discussion 150
Discussion générale 152
Etude 4 : Apprendre à inhiber une heuristique trompeuse pour surmonter les difficultés dans la tâche de conservation du nombre : Convergence de résultats obtenus au laboratoire et en recherche participative. 154
Introduction 155
Expérimentation 1 158
Méthode 158
Participants 158

Matériel 159
Evaluations : pré-test, post-test immédiat et post-test différé ……..…… 159
L'intervention exécutive ……..…… 160
L'intervention contrôle active ……..…… 161
Procédure 161
Résultats 163
Discussion 164
Expérimentation 2 165
Méthode 166
Participants 166
Matériel et procédure 167
Résultats 167
Discussion 169
Discussion générale 171
INNOVATIONS PÉDAGOGIQUES ET MÉDIATION SCIENTIFIQUE…… 173
DISCUSSION GÉNÉRALE ……...178
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES……....191
ANNEXES ……207

PRÉSENTATION GÉNÉRALE DE LA THÈSE

N’avez-vous jamais retrouvé dans l’un de vos mails « Je vous tiendrez au courant » ? Cette erreur n’est probablement pas due à un manque de connaissances en grammaire, mais plutôt à l’utilisation d’une stratégie automatique « après vous je mets -ez » qui fonctionne très bien, très souvent, mais pas toujours. En effet, dans le cas de cet exemple, cette aide mnémotechnique qu’on nous répète depuis le CE2 nous induit en erreur, alors que la plupart du temps, celle-ci nous fait gagner du temps et nous permet de conjuguer convenablement le verbe de la phrase. C’est ce qu’on appelle une heuristique. Pour correctement écrire la phrase citée plus haut, il est nécessaire de bloquer, d’inhiber, cette heuristique pour pouvoir utiliser un algorithme, une stratégie exacte qui permet de réussir en toutes circonstances, ici la règle grammaticale d’accord du verbe avec son sujet.

Chaque jour, nous sommes influencés par ce type d’heuristique qu’il convient de bloquer pour pouvoir donner la bonne réponse à un problème (Houdé, 2019b). C’est le rôle du contrôle inhibiteur (CI), la capacité à résister à des automatismes, des tentations, des distractions ou encore des interférences, et permet une adaptation aux situations avec conflit (Diamond, 2013). Cette compétence est essentielle dans la vie quotidienne, et plus spécifiquement dans l’acquisition de compétences scolaires (Houdé & Borst, 2015). En effet, il arrive souvent que les enfants doivent inhiber une stratégie précédemment apprise, pour en utiliser une nouvelle. Au-delà d’être un prédicteur de la réussite scolaire, de la santé physique et mentale et de la qualité de vie (Moffitt et al., 2011), le CI est également un processus clé du développement cognitif (Borst, Aïte, & Houdé, 2015; Houdé, 2019b).

En partant de ce constat, de nombreuses études se sont donc intéressées aux différentes façons d’entrainer ce CI, et ce dès le plus jeune âge (*e.g.* Diamond, Barnett, Thomas, & Munro, 2007). La littérature actuelle relève principalement deux approches d’entrainement au CI (Jolles & Crone, 2012) : l’entrainement « basé sur le processus » où le CI est renforcé de façon générale et l’entrainement « tâche spécifique » où le CI est renforcé de façon spécifique, autour d’une

tâche précise. Cependant, on observe actuellement très peu d'études engageant les enseignants dans ce processus d'entrainement, alors même que ces derniers sont les acteurs principaux au contact des enfants en situation scolaire. Il semble alors important de s'intéresser aux études qui impliquent des non-chercheurs dans le processus de recherche.

Faire collaborer des chercheurs et des non-chercheurs dans une recherche, autour d'un intérêt commun, c'est le principe des projets de recherche collaborative (Bonney, 1996; Miller-Rushing, Primack, & Bonney, 2012). Ce type de recherche, très développé dans les sciences naturelles (*e.g.* biologie, astronomie), commence à faire son apparition dans les sciences humaines et sociales (*e.g.* en économie avec les travaux d'Esther Duflo). Malheureusement, la plupart des recherches participatives dans le domaine de l'éducation porte sur les pratiques enseignantes, mais ne se centre pas sur les apprentissages des enfants. Les enseignants ne sont donc pas impliqués dans le processus de recherche en tant que co-chercheurs, alors que cela pourrait permettre de rapprocher les enseignants et les chercheurs, et ainsi, permettre le développement de nouvelles pédagogies innovantes, validées scientifiquement.

C'est dans ce cadre théorique que s'inscrit cette thèse CIFRE réalisée en association avec les éditions Nathan et plus particulièrement Lea.fr, une plateforme numérique et collaborative regroupant près de 145 000 enseignants. L'objectif principal de cette thèse est donc de montrer qu'il est possible de faire de la recherche participative en impliquant les enseignants dans le processus de recherche, pour améliorer les apprentissages scolaires des élèves en renforçant leur CI, de façon écologique (au sens de l'environnement de la classe et de l'école). Pour cela, le manuscrit de cette thèse est composé de quatre parties.

La première partie de cette thèse est une introduction théorique consacrée à la présentation des travaux antérieurs ayant motivés nos recherches. Dans un premier chapitre, nous décrivons les modèles du développement de l'enfant et le rôle des fonctions exécutives dans le développement cognitif. Ensuite, dans un deuxième chapitre, nous montrons le rôle clé

du CI dans les acquisitions scolaires (*i.e.* lire et écrire, compter, penser ou raisonner et respecter autrui) puis les différentes façons d'entrainer le CI des enfants. Enfin, dans un troisième chapitre nous expliquons comment passer du laboratoire à la classe en définissant les principes d'une recherche participative et en exposant le cadre de cette thèse.

La deuxième partie de cette thèse est réservée aux contributions expérimentales que nous apportons, par le biais de quatre études de recherche appliquée. Dans une première étude nous montrons qu'un entrainement de 5 semaines, mené par des enseignants dans leur classe, améliore le CI d'enfants de 7 à 12 ans, et qu'un projet de recherche participative en ligne peut fournir des résultats significatifs dans le domaine de l'éducation. Dans la deuxième étude, nous analysons huit heuristiques que les élèves du CE1 au CM2 commettent en classe et pour chacune, nous définissons la période à laquelle les enfants y sont le plus sujets. Dans la troisième étude, nous démontrons qu'un apprentissage au CI ciblé sur l'heuristique « additionner si plus, soustraire si moins » est efficace pour améliorer les performances d'élèves de 7 à 10 ans en résolution de problèmes arithmétiques à contenus verbaux, et ce, que l'entrainement soit mené par le chercheur en individuel, ou par l'enseignant en groupe. Enfin, dans une quatrième et dernière étude nous reproduisons les résultats de l'étude 3 en ciblant l'apprentissage spécifique au CI sur l'heuristique « longueur = nombre » pour améliorer les performances d'enfants d'âge préscolaire dans la tâche piagétienne de conservation du nombre.

La troisième partie de cette thèse sera consacrée à la présentation des innovations pédagogiques issues de cette thèse, ainsi que les différentes actions de médiation scientifique mises en place au sein des éditions Nathan.

Pour finir, la quatrième partie de cette thèse sera une discussion générale proposant une synthèse de nos contributions expérimentales. Nous y aborderons également les apports de nos découvertes pour les pratiques pédagogiques ainsi que les perspectives de recherche pour étendre nos découvertes au monde de l'éducation. Enfin, nous évoquerons les évolutions

envisagées pour les éditions Nathan, notamment par la création d'un pôle de recherche et développement au sein de l'entreprise.

INTRODUCTION THÉORIQUE

Chapitre 1

Le développement cognitif de l'enfant

Le développement cognitif de l'enfant commence dès sa conception, *in utero*. Dans ce premier chapitre, nous aborderons différentes théories décrivant le développement de l'enfant. Nous commencerons par décrire le modèle linéaire et incrémental développé par Jean Piaget, au cours du XXème siècle. Pour lui, le développement se ferait stade par stade, sous la forme d'un escalier. Nous montrerons ensuite les limites de ce modèle par la découverte de compétences précoces chez l'enfant, mais aussi d'incompétences tardives. Nous exposerons ensuite la théorie néo-piagétienne selon laquelle le développement de l'enfant se ferait de façon dynamique et non linéaire. De récentes études ayant montré le rôle essentiel des fonctions exécutives (FE) dans la réussite académique et professionnelle, nous décrirons ces trois fonctions (le contrôle inhibiteur (CI), la mémoire de travail et la flexibilité cognitive) en évoquant leur développement et la façon de les évaluer.

I. Les modèles du développement

1. Le développement cognitif de l'enfant selon Piaget

Au cours du XXème siècle, Jean Piaget, psychologue, biologiste et épistémologue suisse, a développé un modèle décrivant le développement de l'intelligence. Il s'inscrit dans une théorie constructiviste où le développement de l'intelligence se fait progressivement, grâce au potentiel initial de l'enfant mené par l'action et aux interactions entre l'individu et son environnement (voir Houdé, 2020). L'auteur suggère que l'intelligence se développe de façon linéaire et incrémentale, c'est-à-dire stade par stade, sous la forme d'un escalier (Piaget & Inhelder, 1966). Devenir intelligent nécessite donc la succession de différents stades, où chaque stade associé à un concept-clé joue un rôle dans la construction des suivants.

Au cours du premier stade, le stade sensori-moteur qui s'étend de la naissance à environ deux ans, le bébé interprète le monde sur la base des sens et de l'action. En partant de ses réflexes initiaux et par tâtonnements, il va apprendre des règles de plus en plus complexes et se construire une représentation mentale des objets. C'est ce qui va permettre au bébé d'acquérir la permanence de l'objet, autrement dit la capacité à concevoir qu'un objet ou un individu existe toujours, même s'il quitte le champ de vision du bébé (Piaget, 1954). Cette capacité, entre autres, permet alors à l'enfant d'apprendre à manipuler ses représentations mentales et passer au second stade du développement, le stade pré-opératoire couvrant la période de 2 à 7 ans environ. L'enfant pourra alors penser aux actions sans avoir à les mettre immédiatement en place dans la réalité. Cette faculté va permettre à l'enfant d'acquérir les structures mentales du dénombrement et de la catégorisation des objets, c'est-à-dire le traitement quantitatif et qualitatif de ces derniers (Piaget, 1952). C'est seulement à partir du troisième stade, celui des opérations concrètes, compris entre 7 et environ 12 ans, que l'enfant devient logique. Son intelligence devient alors flexible : l'enfant est capable d'imaginer mentalement l'opération

inverse d'une transformation effectuée sous ses yeux. C'est ce qui va lui permettre, par exemple, de réussir les tâches d'inclusion des classes et de conservation du nombre. Enfin, c'est au cours du quatrième et dernier stade, celui des opérations formelles, situé entre 12 et 16 ans environ, que l'enfant devenu adolescent réussit à raisonner de façon abstraite sur des propositions logiques, des idées, ou encore des hypothèses (Inhelder & Piaget, 1955).

2. Les limites du modèle piagétien

Les découvertes de Piaget ont par la suite été remises en question par différents chercheurs montrant des incohérences dans le modèle de développement proposé par le psychologue suisse. Les travaux ultérieurs ont mis en avant que Piaget aurait sous-estimé les capacités précoces des bébés, qui contrairement à ce qu'il postulait, auraient des compétences arithmétiques dès 5 mois (Wynn, 1992). Cette observation s'est faite grâce au paradigme de l'événement impossible. Dans ce dernier, deux situations sont présentées à des bébés, l'une exposant une situation possible, et l'autre arithmétiquement impossible. Si les bébés sont étonnés par la scène impossible, qui transgresse leurs attentes, alors ils fixeront plus longtemps cette scène. Dans cette expérimentation, un personnage Mickey est placé sur une scène devant des bébés de 5 mois (*c.f.* Figure 1). Un écran opaque est ensuite relevé, masquant le Mickey sur scène, ce qui présuppose déjà la permanence de l'objet. Ensuite, une main visible par le bébé vient placer un second Mickey sur la scène derrière l'écran opaque, puis ressort de derrière l'écran, vide. On présente alors deux situations au bébé en mesurant le temps de fixation de ce dernier pour chacune d'elle. Dans la situation possible, quand l'écran se baisse, deux Mickeys sont présents (*i.e.* 1+1 = 2). Dans la situation impossible, lorsque l'écran se baisse, seul un Mickey apparaît (*i.e.* 1+1 = 1). Les résultats de cette étude démontrent que, dès 5 mois, les bébés regardent plus longtemps la situation impossible, que la situation possible. Cette surprise

montre que les bébés ne s'attendent pas à ce résultat et qu'ils savent qu'une addition entraîne un changement exact du nombre d'items, car ils sont aussi surpris par la situation impossible « 1+1 = 3 ». Les bébés disposent donc de capacités arithmétiques dès le plus jeune âge, au cœur de la notion du nombre.

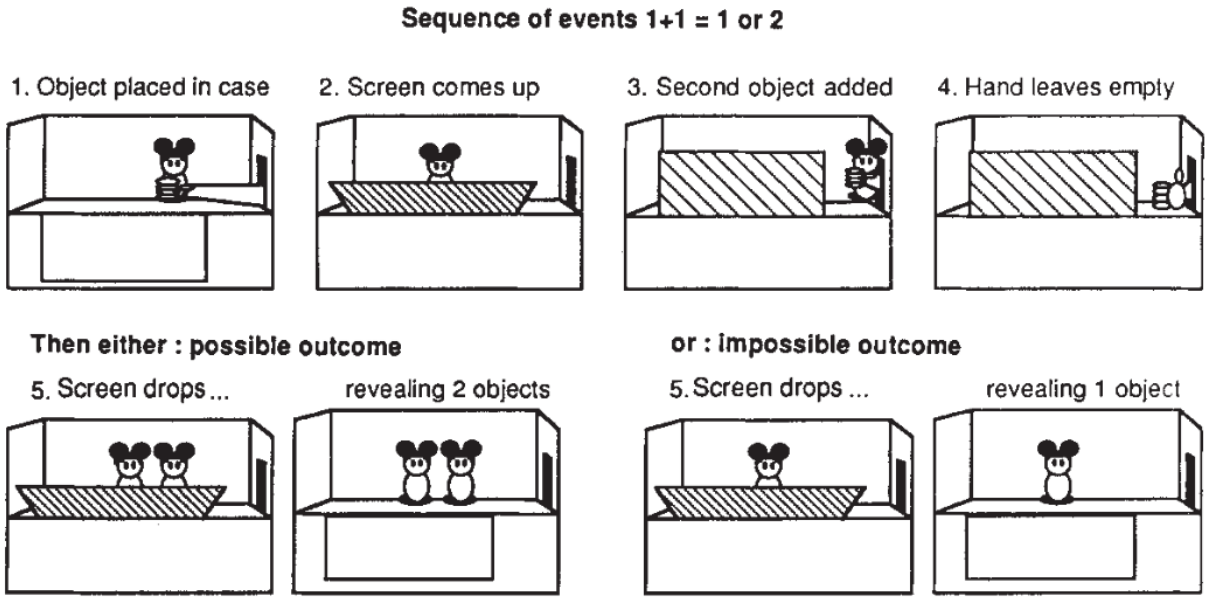


Figure 1. Dès 5 mois les bébés sont surpris face à une situation arithmétique impossible (1+1 = 1).

De plus, la théorie du développement de Piaget ne permet pas non plus d'expliquer les erreurs tardives observées sur des tâches qui requièrent des compétences logiques censées être acquises. Prenons l'exemple de la tâche d'Evans, où il est demandé à des adultes de choisir deux formes géométriques, l'une à placer à gauche, l'autre à droite, afin de falsifier la règle suivante : « S'il n'y a pas de carré rouge à gauche, alors il y a un cercle jaune à droite » (*c.f.* Figure 2) (Evans, 1972). Au sens de la logique formelle, cette tâche est simple. Elle doit donc être réussie par toutes les personnes ayant atteint le stade des opérations formelles, dès l'adolescence selon Piaget. Cependant, on constate que les adultes échouent à plus de 90%. En effet, ces derniers répondent selon un biais d'appariement perceptif en reprenant les éléments de la règle à falsifier : ils placent un carré rouge à gauche et un cercle jaune à droite. Cependant, pour réussir, il faut utiliser la règle logique qui nécessite d'affirmer l'antécédant (*i.e.* pas de

carré rouge à gauche) et de réfuter le conséquent (*i.e.* pas de cercle jaune à droite), autrement dit de placer tout sauf un carré rouge à gauche et tout sauf un cercle jaune à droite. Cette expérimentation et cette erreur de logique suggèrent donc que le raisonnement serait jalonné d'erreurs, de biais perceptifs et cognitifs, jusqu'à l'âge adulte.

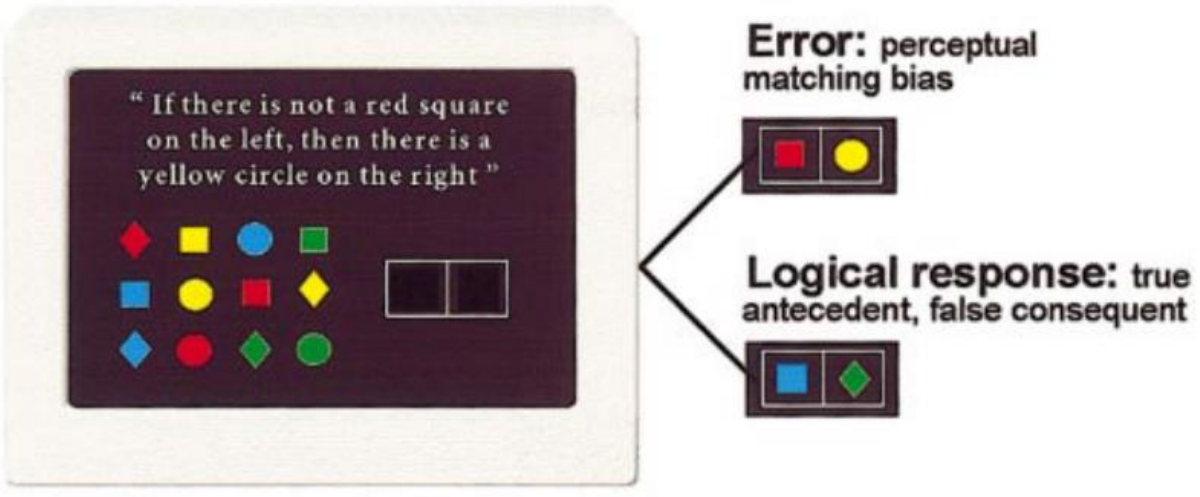


Figure 2. Plus de 90% des adultes échouent et utilisent un biais d'appariement perceptif les faisant répondre "carré rouge à gauche et cercle jaune à droite" (d'après Houdé et al., 2000*).*

L'ensemble de ces éléments montre donc que le modèle des stades du développement en escalier conçu par Piaget au cours du XXème siècle comporte certaines incohérences et ne permet pas de décrire avec exactitude les étapes du développement de l'enfant. D'autres auteurs ont alors suggéré que le développement de l'enfant se ferait plutôt de façon dynamique et non-linéaire.

3. Un développement dynamique et non linéaire

A la fin des années 1990, Robert Siegler a proposé un nouveau modèle de développement cognitif qui était quant à lui dynamique et non linéaire, illustré par « des vagues qui se chevauchent » (*Overlapping Waves Theory*) (Siegler, 1996). Selon cette théorie, l'enfant

aurait à sa disposition plusieurs stratégies cognitives pour résoudre un problème donné, à un instant donné. Au fil du temps et de l'expérience, l'enfant utiliserait certaines stratégies plus ou moins fréquemment, en découvrirait de nouvelles et en éliminerait d'autres (*c.f.* Figure 3). L'enfant posséderait donc plusieurs stratégies pour résoudre un problème donné, à un instant donné, et utiliserait celle qui lui semble la plus efficace parmi son répertoire de stratégies connues.

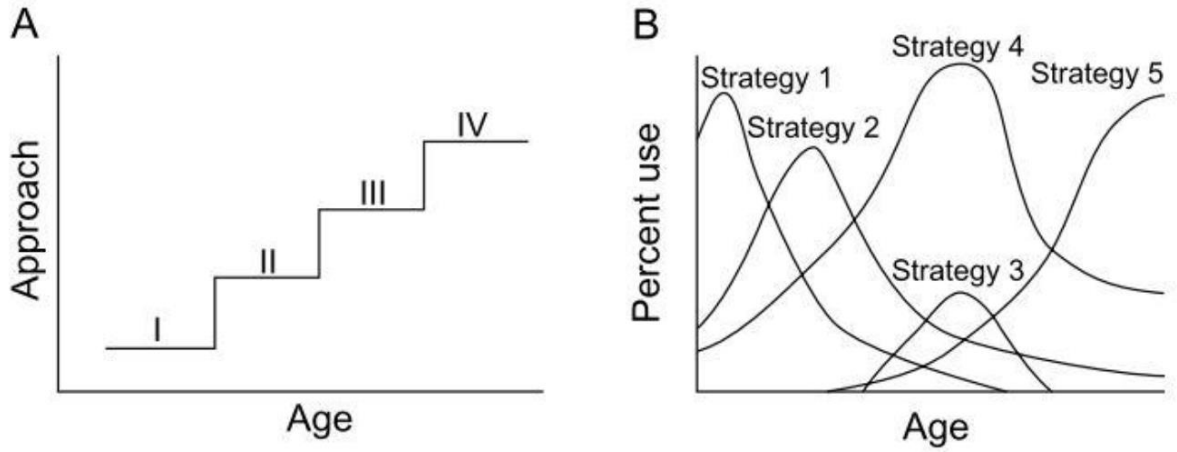


Figure 3. (A) Le développement de l'enfant vu par Piaget comme une succession de marches où la précédente est essentielle pour atteindre la suivante (adapté de Piaget & Inhelder, 1966). (B) Le développement non-linéaire et dynamique vu comme des vagues qui se chevauchent où la fréquence d'usage de chaque stratégie évolue en fonction de l'âge (adapté de Siegler, 1999).

D'après le psychologue Daniel Kahneman, l'ensemble de ces stratégies peuvent se catégoriser selon deux familles, les heuristiques intuitives et les algorithmes logiques et rationnels (Kahneman, 2011). Il définit les heuristiques comme le système 1, un système de pensée intuitif, automatique, rapide et demandant peu d'effort cognitif. A l'opposé se trouve le système 2, celui des algorithmes logico-mathématiques. Ce système induit une pensée réfléchie et fiable, mais qui, de ce fait, est plus longue et plus coûteuse cognitivement que celle du premier système. Selon cette théorie, qui a permis à Kahneman de devenir le seul psychologue contemporain détenteur d'un prix Nobel (d'économie, 2002), nous aurions tendance à utiliser des stratégies heuristiques, par souci d'économie. Cependant, si ces dernières demandent peu d'effort et sont très souvent adaptées, elles entrainent parfois des erreurs de jugement. C'est alors ce qui expliquerait les erreurs tardives désignées précédemment : les personnes qui

échouent n'ont pas un défaut de logique, elles utilisent une stratégie heuristique, rapide, automatique et économique, au détriment d'une stratégie algorithmique qui permet une bonne réponse mais nécessite plus de temps et d'effort cognitif que la première.

Olivier Houdé s'est ensuite inspiré de cette théorie de pensée à double vitesse pour la compléter et établir un modèle de pensée à trois systèmes ou processus (Houdé, 1997b, 2019a, 2020a). Selon le psychologue, les heuristiques et les algorithmes seraient accompagnés d'un troisième système de pensée : celui de l'inhibition (*c.f.* Figure 4). Ce système 3 aurait une fonction d'arbitrage, d'aiguillage, lorsque les deux premiers systèmes sont en conflit, permettant d'interrompre le système heuristique et d'activer le système algorithmique, qui lui permet d'aboutir à la bonne réponse en toutes circonstances. Selon la théorie de Houdé, la capacité d'inhibition serait donc essentielle dans la vie de tous les jours pour pouvoir accéder à nos algorithmes, lorsqu'ils sont en conflit avec nos heuristiques.

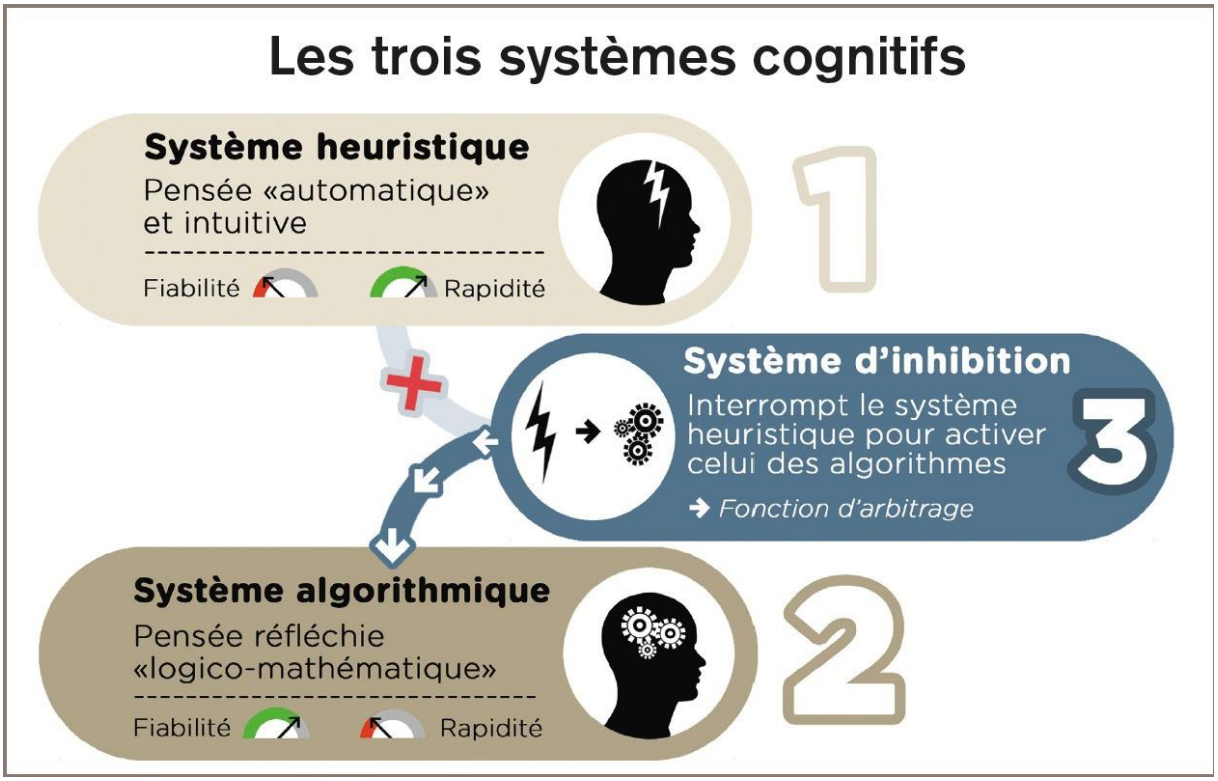


Figure 4. La pensée serait contrôlée par trois systèmes cognitifs où le système d'inhibition permet d'interrompre le système heuristique, au profit du système algorithmique (adapté de Houdé, 2019).

II. Les fonctions exécutives au cœur du développement

Les fonctions exécutives (FE) sont un ensemble de processus cognitifs de haut niveau, essentiel pour la régulation intentionnelle de la pensée, des émotions et des actions dans l'objectif d'atteindre un but (Diamond, 2013; Miyake et al., 2000). Elles nous sont particulièrement utiles lorsque nous faisons une tâche qui rivalise avec nos habitudes, nos impulsions et nos désirs (Doebel, 2020). On reconnaît classiquement l'existence de trois FE principales : le contrôle inhibiteur, la mémoire de travail et la flexibilité cognitive (*c.f.* Figure 5) (Diamond, 2013; Miyake et al., 2000). C'est à partir de ces dernières que sont construits le raisonnement, la résolution de problèmes et la planification (Collins & Koechlin, 2012; Lunt et al., 2012). Les FE sont donc indispensables pour la santé physique et mentale, la réussite scolaire et le développement cognitif, social et psychologique (Diamond, 2013). D'un point de vue neuroanatomique, les FE sont sous-tendues par les réseaux cérébraux du cortex préfrontal (Diamond & Lee, 2011; Diamond & Ling, 2016) et auquel leur développement est donc associé (Diamond, 2013; Hodel, 2018).

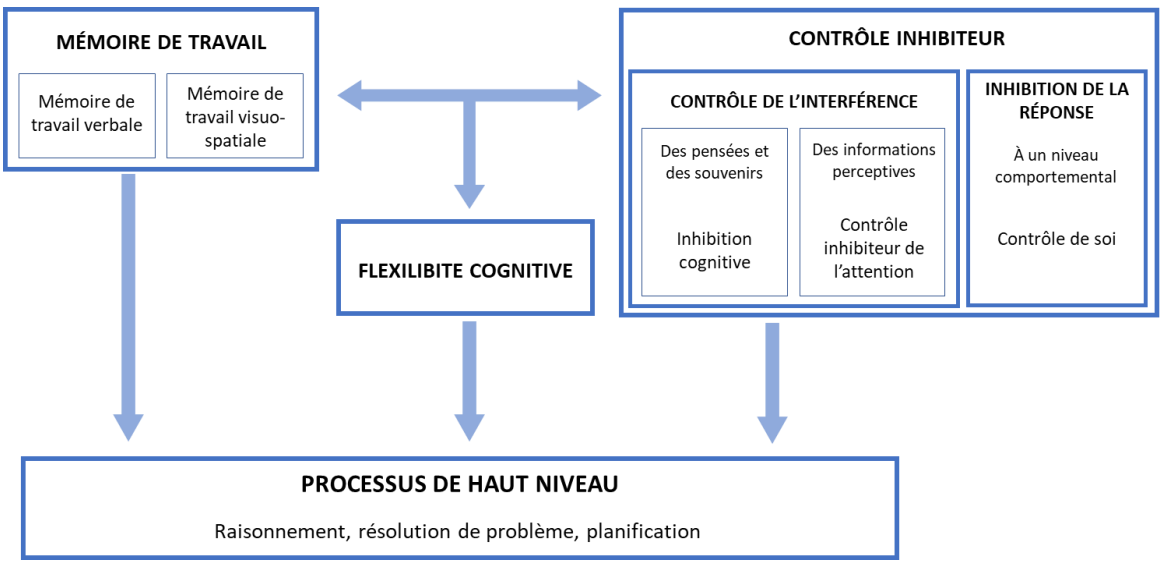


Figure 5. Les trois composantes principales des fonctions exécutives (adapté de Diamond, 2013).

1. Le contrôle inhibiteur

Le contrôle inhibiteur (CI) est défini par la capacité à résister à des automatismes, des tentations, des distractions ou encore des interférences, et permet une adaptation aux situations avec conflit (Diamond, 2013). Sans celui-ci, nous nous laisserions entièrement guider par nos impulsions, nos anciennes habitudes ou encore les stimuli de l'environnement. Dans un article de 2013, Diamond décrit les FE et leur développement ; elle distingue trois composantes du CI : le CI de l'attention, l'inhibition cognitive et le contrôle de soi. Le CI de l'attention nous permet de nous concentrer sur les stimuli pertinents pour répondre à une tâche, en supprimant notre attention des stimuli qui ne le sont pas. Cette capacité est par exemple essentielle lorsque l'on souhaite converser au milieu d'un brouhaha : on se concentre sur notre interlocuteur en inhibant la voix des personnes autour. L'inhibition cognitive, quant à elle, correspond à la suppression de représentations mentales ou de processus dominants précédemment stockés en mémoire. Cette composante est nécessaire lorsque l'on doit, par exemple, faire un détour sur le chemin habituellement utilisé pour se rendre au travail. Ces deux composantes (*i.e.* le CI de l'attention et l'inhibition cognitive) se regroupent dans ce qu'on appelle plus généralement le contrôle des interférences. Enfin, la dernière composante du CI est le contrôle de soi, l'inhibition de la réponse. Ce dernier est la capacité à résister aux tentations et à ne pas agir de manière impulsive. Cette capacité est parfaitement illustrée dans l'expression « Il faut tourner sa langue sept fois dans sa bouche avant de parler ».

Afin d'évaluer le CI, il existe plusieurs tâches ou paradigmes expérimentaux. La première tâche et la plus légendaire de la psychologie expérimentale créée pour mesurer le contrôle des interférences est le test de Stroop (Stroop, 1935). Il repose sur notre capacité, devenue automatique au fil du temps et de l'entrainement, à s'intéresser à la lecture et au sens des mots que l'on voit, plutôt qu'à leur forme ou leur couleur. L'objectif de cette tâche est donc de réussir à ignorer cette réponse automatique de lecture pour en activer une autre, qui ne l'est

pas. Le but de cette tâche est de déterminer la couleur de l'encre d'un mot, qui lui-même représente une couleur. Dans les essais incongruents, qui nécessitent donc d'inhiber, on présente aux participants des noms de couleur présentés dans une autre couleur (*e.g.* **bleu**). On remarque alors que les participants sont plus lents à répondre et font plus d'erreurs que face à des essais congruents (*i.e.* où la couleur de l'encre correspond au mot écrit ; **bleu**). Cette tâche de Stroop a été répliquée de nombreuses fois et enrichie, pour par exemple convenir à des participants dont la lecture n'est pas encore automatisée (*e.g.* Stroop-like day/night task, Gerstadt, Hong, & Diamond, 1994).

L'inhibition de la réponse motrice, quant à elle, peut se mesurer grâce au paradigme de Go/No-Go. Dans ce type de tâche, les participants doivent appuyer sur un bouton à la vision d'un stimulus (Go), mais inhiber cette action, et donc ne pas appuyer sur le bouton, à la vision de certains autres stimuli (No-Go). Contrairement au Stroop, ici les participants ne doivent pas inhiber une action pour en formuler une autre, mais seulement inhiber une réponse et ne rien faire.

On trouve également dans la littérature un paradigme permettant de mesurer l'implication du CI dans une tâche donnée : l'amorçage négatif (Tipper, 1985) (*cf.* Figure 6). Le principe de ce paradigme est le suivant : si une représentation, un processus ou une stratégie est inhibé dans un premier temps, alors l'activation de cette représentation, ce processus ou cette stratégie sera ensuite perturbé en raison de la désinhibition nécessaire. Cette perturbation va alors s'observer par un temps de réponse plus long ou un taux d'erreurs plus grand. Pour cela, l'expérimentateur établit deux conditions : une condition test et une condition contrôle, toutes deux constituées de deux items, un item d'amorce suivi d'un item cible. Les performances des participants sont comparées entre l'item cible de la condition test où la cible est le distracteur inhibé en amorce, et l'item cible de la condition contrôle où la cible n'a pas de rapport avec le distracteur précédent (amorce). On observe alors un effet d'amorçage négatif

lorsque les participants sont plus longs, ou répondent moins bien à une cible, alors qu'elle a été précédemment inhibée, plutôt qu'à une cible non traitée précédemment. Inhiber un distracteur dans un premier temps a donc un coût lorsque l'on doit ensuite l'utiliser, ainsi que l'ont démontré de nombreuses études autour des tâches logico-mathématiques, dont les tâches piagétiennes de conservation du nombre et d'inclusion des classes (Houdé & Borst, 2014).

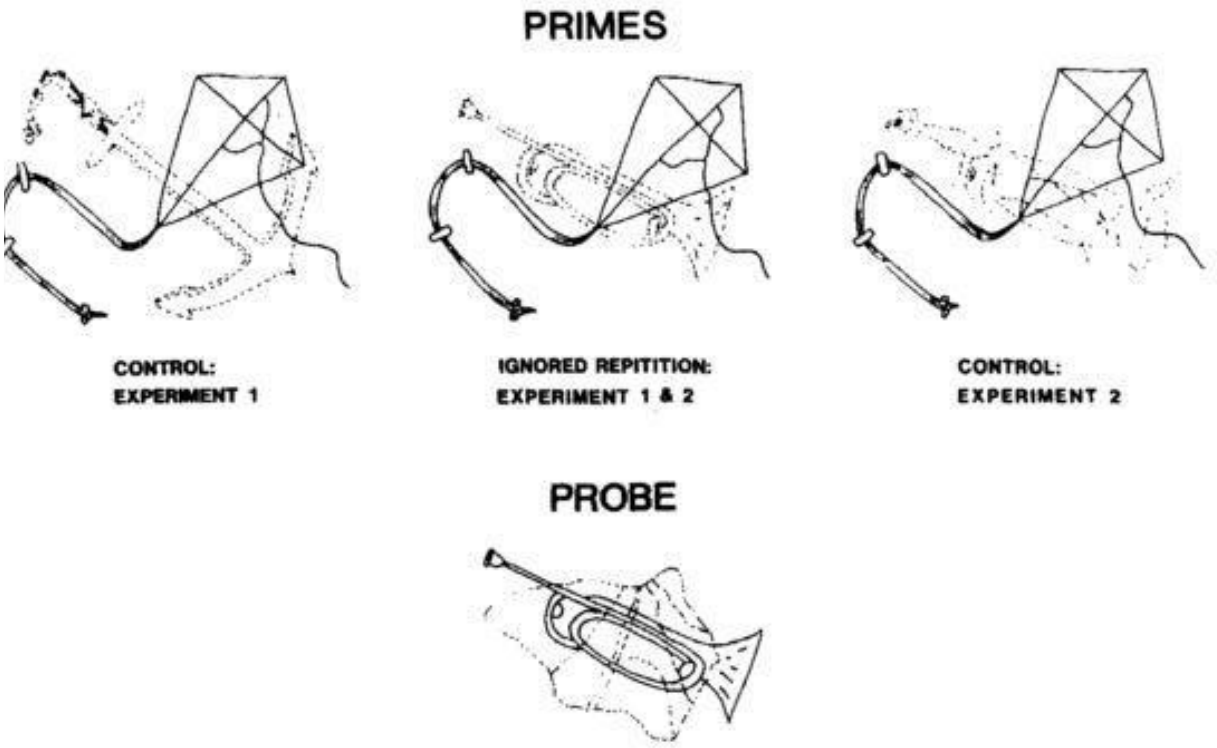


Figure 6. Paradigme de l'amorçage négatif où on compare le temps d'une détection d'une cible (probe, la trompette) dans une condition test où l'item-probe (la trompette sur un fond de mouchoir) est précédé par un item-prime dans lequel le distracteur correspond à la cible de l'item-probe (un cerf-volant sur fond de trompette) au temps de détection dans une condition contrôle où le même item-probe est précédé par un item-prime dans lequel le distracteur n'entretient pas de relation avec la cible de l'item-probe (un cerf-volant sur fond d'ancre marine).

Le développement du CI commence dès le début de la vie, puisque dès 9 mois, les bébés sont capables d'inhiber une réponse spatiale inappropriée (Amso & Johnson, 2005). L'inhibition de l'erreur A-non-B dans la tâche de permanence de l'objet de Piaget en est un autre exemple à cet âge (Houdé, 2000). Les trois composantes du CI vont ensuite se développer progressivement durant l'enfance, notamment entre 5 et 8 ans (Romine & Reynolds, 2005), puis tout au long de l'adolescence (Luna, Garver, Urban, Lazar, & Sweeney, 2004). On

distingue cependant que le développement de chacune des composantes suit une trajectoire différente (Aydmune, Introzzi, & Lipina, 2019). L'inhibition de la réponse est la plus étendue avec un développement dès la première année de vie, puis une forte évolution pendant la période préscolaire et scolaire, et enfin un développement assez linéaire jusqu'à la fin de l'adolescence voire le début de la vie adulte (Amso & Johnson, 2005; Carlson & Moses, 2001; Cragg & Nation, 2008; Van Gerven, Hurks, Bovend'Eerdt, & Adam, 2016). Le CI de l'attention suit une trajectoire développementale similaire à l'inhibition de la réponse de la première année de vie à l'adolescence (Aydmune et al., 2019). Enfin, pour ce qui est de l'inhibition cognitive, on observe un début de développement pendant la période préscolaire, avec une forte évolution de celui-ci pendant la période scolaire. Il se poursuit ensuite jusqu'à l'adolescence (Harnishfeger, 1995; Kail, 2002).

2. La mémoire de travail

La mémoire de travail (MdT) est la capacité à stocker et manipuler temporairement des informations. Il s'agit donc de pouvoir travailler avec une information, ou une instruction, alors même qu'elle n'est plus perceptivement présente (Baddeley & Hitch, 1994). Cette FE nous permet de donner un sens à tout ce qui nous entoure en gardant à l'esprit les événements qui viennent de se dérouler pour ensuite les relier aux futurs. Cette capacité est donc essentielle pour toutes les tâches du quotidien : parler, lire, écrire, compter, raisonner, etc... Elle nous permet de créer des liens entre les différents éléments, mais aussi de séparer les éléments d'un tout pour pouvoir les traiter individuellement. Classiquement, on distingue deux types de MdT, la verbale et la non-verbale (*i.e.* visio-spatiale) (Diamond, 2013).

Afin d'évaluer les capacités de MdT, il est possible d'utiliser des tâches d'empan mnémonique. La plus utilisée est la tâche d'empan de chiffres. Dans cette dernière, une liste de

chiffres est énoncée à un participant et ce dernier a pour consigne de les restituer dans l'ordre énoncé. Au fur et à mesure, le nombre de chiffres augmente dans les séries. La capacité d'empan est ensuite déterminée par le nombre d'éléments contenus dans la dernière série correctement rappelée par le participant. L'empan peut également se mesurer de façon visuo-spatiale, en utilisant des blocs de Corsi (Corsi, 1973). Dans ce cas, la consigne sera de reproduire un chemin dans l'espace composé de plusieurs blocs. Afin d'évaluer le maintien, mais aussi le traitement de l'information, il est possible de proposer ces tâches d'empan en version inversée. Dans ce cas, il est demandé aux participants de restituer les éléments précédemment retenus de façon inversée. Ainsi, si l'expérimentateur énonce « 2-8-6-3 », le participant devra rappeler « 3-6-8-2 ».

La MdT se développe très précocement puisque dès la première année de vie, les bébés sont capables de maintenir en mémoire un à deux éléments (Diamond, 1995). De plus, la tâche de Wynn précédemment présentée, montrant que des bébés de 5 mois ont des capacités arithmétiques précoces, prouve également leur capacité de MdT à maintenir et travailler avec plusieurs éléments perceptivement absents (cachés derrière un écran). Cependant, l'évolution de cette FE est longue et les capacités à retenir de nombreux éléments ou à faire des manipulations mentales complexes se développent plus lentement et ont une progression développementale prolongée (Case, 1991; Crone, Wendelken, Donohue, van Leijenhorst, & Bunge, 2006; Pascual-Leone, 2000). Contrairement au CI qui connaît des pics d'évolution, le développement de la MdT semble linéaire de la période préscolaire à l'adolescence (Best & Miller, 2010).

3. La flexibilité cognitive

La flexibilité cognitive regroupe différents aspects. Le premier est d'être capable de changer de perspective spatiale ou interpersonnelle, c'est-à-dire d'imaginer un problème depuis une autre situation ou direction ou bien depuis un autre point de vue. La flexibilité cognitive nous permet également de changer notre façon de réfléchir à un problème, en envisageant de nouvelles stratégies. C'est ce que le physiologiste Alain Berthoz appelle la vicariance, concept issu de la psychologie différentielle (Berthoz, 2013). Cette capacité est par exemple requise lorsque l'on doit remplacer un ingrédient manquant dans une recette de cuisine. De manière générale, cette FE nous permet d'être flexible pour s'adapter aux nouvelles demandes ou priorités, admettre qu'on ait pu faire une erreur et profiter d'opportunités soudaines et inattendues (Diamond, 2013). La flexibilité cognitive permet donc de penser de manière divergente et de s'adapter à un environnement en constante évolution (Buttelmann & Karbach, 2017). Pour plusieurs auteurs, la flexibilité cognitive se construirait à partir des capacités de CI et de MdT. En effet, pour changer de point de vue ou de stratégie, il est nécessaire d'inhiber le premier point de vue ou la première stratégie, mais aussi d'avoir accès et de pouvoir manipuler plusieurs points de vue ou stratégies simultanément (Davidson, Amso, Anderson, & Diamond, 2006; Diamond, 2013; Houdé, 2000, 2019a). Les capacités de flexibilité mentale seraient donc dépendantes des deux autres FE.

La flexibilité cognitive s'évalue avec des tâches de changement de consignes ou de règles. L'une des plus célèbres est le *Wisconsin Card Sorting Test* (WCST, Grant & Berg, 1948). Ce test est composé de cartes, illustrant des figures géométriques colorées plus ou moins nombreuses, pouvant être triées de trois façons différentes : couleur, forme ou nombre. Il est alors demandé au participant d'inférer le bon critère de tri en se basant sur le feed-back de l'expérimentateur et de changer de critère de tri de façon flexible, c'est-à-dire ne pas rester figé sur le premier critère choisi (l'inhibition), lorsque ce dernier est modifié par l'expérimentateur.

On va alors compter le nombre de persévérances de l'enfant face à un changement de critère. Plus l'enfant a de bonnes capacités de flexibilité cognitive, moins elles seront nombreuses. Une autre façon d'évaluer la flexibilité cognitive est d'utiliser un paradigme utilisant deux tâches. C'est le cas du *Trail Making Test* mis au point en 1944 par l'armée américaine dans le cadre d'une évaluation cognitive. Ce test est composé de deux parties. Dans la première, partie A, les participants ont face à eux une fiche composée de nombres allant de 1 à 25. Il leur est demandé de relier ces items de façon croissante, le plus rapidement possible. La partie B quant à elle, est composée de deux séries que le participant doit intercaler. La planche est composée de chiffres et de lettres qu'il convient de combiner en alternance : 1-A-2-B-3… Le participant doit donc constamment activer et/ou inhiber les suites arithmétiques et alphabétiques. La différence de temps de réponse entre la première et la seconde planches correspond au temps nécessaire au participant pour alterner entre deux consignes. Plus le participant a de bonnes capacités de flexibilité cognitive, plus la différence sera petite.

Cette capacité de flexibilité cognitive se développe plus tardivement que le CI et la MdT, mais est toutefois dépendante de la nature de la tâche demandée (Diamond, 2013). En effet, on observe que les enfants de 30 mois sont capables d'associer une réponse à une localisation dans un premier temps, puis de changer cette localisation ensuite (Perner & Lang, 2002). En revanche, lorsqu'il s'agit de jongler entre deux règles dans une adaptation du WCST, on observe que les enfants n'y arrivent qu'à partir de 4 ans (Doebel & Zelazo, 2015). Les capacités de flexibilité mentale se développent ensuite très rapidement, et dès 11 ans, les enfants ont des capacités similaires à celles des adultes (Huizinga & Van Der Molen, 2007). La période entre 5 et 11 ans environ est donc synonyme de grande plasticité et malléabilité, sensible aux changements liés au développement et à l'environnement (Buttelmann & Karbach, 2017).

III. Conclusion

Les modèles de développement cognitif actuels ont délaissé l'idée d'un développement stade par stade et ont mis en avant que le développement cognitif de l'enfant serait dynamique et non-linéaire (Houdé, 2000, 2019a, 2020a; Siegler, 1996). Ces derniers mettent également en avant le rôle des FE dans le développement. Ces processus cognitifs de haut niveau sont complémentaires mais aussi interdépendants. Il y aurait, au cours du développement, une variation du degré d'unité et de diversité des FE (Miyake et al., 2000). Ces dernières seraient impliquées dans tous les domaines cognitifs et socio-émotionnels (Casey & Caudle, 2013; Houdé, 2000) et auraient une grande importance pour la réussite scolaire, santé physique et mentale, qualité de vie (Moffitt et al., 2011) et les aptitudes socio-émotionnelles (Carlson & Moses, 2001).

Dans le cadre de cette thèse, nous souhaitons plus particulièrement nous centrer sur le CI. En effet, dans leur article de 2000, Miyake et son équipe suggèrent que l'inhibition pourrait avoir un rôle central dans les capacités de MdT et de flexibilité mentale. De plus, il semblerait que le CI soit un processus clé du développement cognitif (Borst, Aïte, et al., 2015; Houdé, 2000, 2019b), notamment dans l'acquisition des compétences scolaires (Houdé & Borst, 2015). Cette approche renouvelle donc celle de Piaget pour l'analyse des tâches logico-mathématiques de laboratoire et ouvre aussi plus spécifiquement sur les apprentissages scolaires.

Chapitre 2

Le contrôle inhibiteur à l'école

Le chapitre précédent nous a permis de montrer le rôle essentiel des FE, et plus particulièrement du CI. Ainsi, dans ce deuxième chapitre nous souhaitons décrire le CI plus spécifiquement dans le contexte de l'école. Dans un premier temps, nous allons donc montrer le rôle du CI au sein des quatre fondamentaux établi à par l'Éducation nationale, à savoir lire et écrire, compter, penser ou raisonner et respecter autrui. Nous présenterons les corrélations existantes entre le CI et ces quatre fondamentaux, et pour chacun d'eux, nous décrirons des paradigmes d'amorçage négatif démontrant, de façon spécifique, le rôle du CI dans la réalisation de certaines tâches scolaires. Dans un second temps, nous aborderons les entrainements au CI chez les enfants d'âge préscolaire et scolaire. Nous présenterons les points-clés d'un entrainement, les différents bénéfices que nous pouvons en attendre ainsi que leur stabilité temporelle, pour finir sur les différents approches et formats possibles d'un entrainement au CI.

I. Le rôle du contrôle inhibiteur dans les acquisitions scolaires

Afin de connaître le lien existant entre le CI et les acquisitions scolaires, de nombreuses études se sont intéressées aux corrélations entre le niveau de CI et la réussite scolaire, de façon longitudinale ou non. C'est par exemple le cas d'une étude de 2007 ayant interrogé les corrélations entre le niveau de CI et les capacités précoces de deux habilités scolaires majeures, les mathématiques et la lecture, chez des élèves de 3 à 5 ans issus d'un milieu socio-économique défavorisé (Blair & Razza, 2007). Pour cela, le CI était mesuré par une tâche de *tapping* reposant sur l'inhibition d'une tendance naturelle à imiter l'action d'un expérimentateur (Diamond & Taylor, 1996), ainsi que le *Children's Behavior Questionnaire* version raccourcie, où l'enseignant et le parent de l'enfant répondaient à des items du type « peut attendre pour commencer une nouvelle activité quand on lui demande » par le biais d'échelles de Likert allant de « extrêmement vrai » à « extrêmement faux » (Putnam & Rothbart, 2006). Concernant les compétences précoces académiques, elles étaient évaluées selon trois pôles : les connaissances mathématiques, la conscience phonologique et la connaissance des lettres. Les résultats de l'étude ont alors montré que le CI était positivement associé aux compétences scolaires précoces des jeunes enfants. De façon complémentaire, les auteurs ont montré qu'il existait un lien plus fort entre le CI et les mathématiques qu'entre le CI et l'alphabétisation émergente (Blair & Razza, 2007). Ce constat a également été retrouvé dans une méta-analyse étudiant les relations entre le CI et le développement des compétences académiques chez des élèves de 2,5 ans à 6,5 ans (Allan, Hume, Allan, Farrington, & Lonigan, 2014). Selon les différents auteurs, cette différence de force de corrélation entre les compétences précoces en mathématiques et en littéracie pourrait s'expliquer de deux façons différentes. Tout d'abord, l'identification des lettres et la conscience phonologique sont des tâches très rapidement automatisées, contrairement aux compétences mathématiques. Cela demanderait donc moins d'implication des FE, et plus particulièrement du CI chez les jeunes enfants (Blair & Razza, 2007). De plus,

le lien très fort existant entre le CI et les mathématiques pourrait être expliqué par l'implication de régions cérébrales similaires (*i.e.* le cortex préfrontal) entre la résolution de problèmes arithmétiques et la complétion de tâches de CI (Espy, McDiarmid, Cwik, Stalets, et al., 2004).

Plus récemment, une équipe américaine s'est intéressée au développement des FE et à son implication dans la réussite scolaire et les comportements des enfants de la Grande Section de maternelle (*i.e.* GS ; *kindergarten*) au Cours Elémentaire première année (*i.e.* CE1 ; *second grade*) (Morgan, Farkas, Hillemeier, Pun, & Maczuga, 2019). Dans cette étude, les auteurs relèvent que les trois FE ont un impact sur la réussite scolaire à 8 ans. Autrement dit, les capacités des FE en GS permettraient ensuite d'avoir de bonnes capacités scolaires en CE1. En ce qui concerne le CI, notre FE d'intérêt dans cette thèse, l'étude révèle qu'il est un prédicteur de la réussite académique, mais aussi du comportement en classe. Plus précisément, un bon niveau de CI à 5 ans prédirait ensuite de bonnes capacités en lecture, en mathématiques et en sciences à 8 ans. En outre, le niveau de CI serait particulièrement prédictif des problèmes de comportements d'internalisation (*e.g.* anxiété, affectivité négative) et d'externalisation (*e.g.* bagarre, fugue) de l'enfant (Morgan et al., 2019).

Ces premières études montrent donc que le CI a un rôle très important dans la réussite scolaire de façon générale. Afin d'approfondir ces différents résultats, nous avons souhaité présenter les liens plus précis existant entre le CI et les quatre fondamentaux établis par l'Education nationale pour les élèves à l'école : 1) lire et écrire, 2) compter, 3) penser ou raisonner et 4) respecter autrui.

1. Lire et écrire

Une récente étude s'est intéressée au lien existant entre le CI et les précurseurs de la lecture et de l'écriture chez des enfants d'âge préscolaire (Gandolfi, Traverso, Zanobini,

Carmen, & Viterbori, 2021). Pour cela, les auteurs ont évalué les capacités de CI d'enfants de 28 à 36 mois, ainsi que leur vocabulaire à l'oral. Ces mêmes enfants ont ensuite été revus entre 49 et 72 mois dans le but de passer une batterie d'évaluations d'alphabétisation (*e.g.* tâches de conscience phonologique ou encore de connaissance orthographique). L'étude révèle que le développement des prédicteurs de l'alphabétisation est associé aux capacités de CI à 2-3 ans, et que la suppression des interférences est un processus clé dans l'acquisition et la construction de la conscience phonologique et des connaissances orthographiques précoces (*i.e.* deux précurseurs de la lecture et de l'écriture) (Gandolfi et al., 2021).

Intéressons-nous maintenant plus particulièrement à la lecture. Réussir à lire fait appel à deux composantes : le décodage et la compréhension (Gough & Tunmer, 1986). Ces deux composantes sont séparables, mais pour autant fortement corrélées chez les individus n'ayant pas de trouble de la lecture (Klauda & Guthrie, 2008). Les études s'intéressant aux capacités de CI dans la lecture ont donc distingué la compréhension (Borella, Carretti, & Pelegrina, 2010) et le décodage, et plus particulièrement la vitesse de celui-ci (Johann, Könen, & Karbach, 2020). Dans leur étude de 2010, Borella et son équipe se sont donc intéressés aux liens entre la compréhension en lecture et les différents composants du CI (Borella et al., 2010). Pour cela, ils ont recruté des enfants de 10-11 ans ayant de bonnes et de mauvaises capacités de compréhension, et leur ont fait passer des évaluations mesurant les trois composantes du CI (*i.e.* le CI de l'attention, l'inhibition cognitive et le contrôle de soi). Les résultats montrent uniquement une différence entre les élèves ayant une bonne et une mauvaise compréhension de lecture au niveau de l'inhibition cognitive. En effet, les élèves ont des performances non différenciables, peu importe leur capacité de compréhension, en CI de l'attention et en inhibition de la réponse. Ce résultat suggère donc que les difficultés en compréhension des enfants de 10-11 ans seraient reliées à une difficulté à supprimer des informations qui ne sont pas pertinentes (Borella et al., 2010). Une étude plus récente s'intéressant au rôle des FE et de

l'intelligence dans la compréhension et la vitesse de lecture des enfants de 8-11 ans a également rapporté cette non-corrélation entre l'inhibition de la réponse et la compréhension en lecture (Johann et al., 2020). Cependant, les auteurs observent que le CI, évalué par l'interférence à la tâche de Stroop, est associé positivement à la vitesse de lecture. Ainsi, moins les enfants sont sujets aux interférences, plus ils seront rapides dans leur décodage et donc dans leur lecture (Johann et al., 2020).

Ces deux études montrent donc qu'il existe des liens entre le CI et les capacités de lecture. Pour aller plus loin, nous avons également souhaité présenter deux exemples, l'un de lecture, l'autre d'écriture, pour lesquels l'implication du CI est essentielle : la généralisation en miroir et la conjugaison de verbes. La généralisation en miroir est une compétence innée de notre système visuel nous permettant de reconnaître que deux objets sont similaires lorsque l'un est le miroir de l'autre (Baylis & Driver, 2001). Cette compétence présente chez les adultes (Dehaene et al., 2010), les enfants (Nelson & Peoples, 1974) et les bébés (Bornstein, Gross, & Wolf, 1978) devient néanmoins problématique lorsque les objets en question sont des lettres, et plus particulièrement quand ces dernières ont une image en miroir (*i.e.* le b, d, p et q) (Cornell, 1985). Une série d'études, déjà citées, a été menée afin de savoir si la discrimination de ce type de lettres avait un lien avec la capacité à inhiber le processus de généralisation en miroir (Ahr, Houdé, & Borst, 2016, 2017; Borst et al., 2015; Brault Foisy, Ahr, Masson, Houdé, & Borst, 2017). Pour cela les auteurs ont utilisé un paradigme d'amorçage négatif qu'ils ont décliné en différentes versions. Dans l'une de ces études, des enfants de 6, 8 et 10 ans devaient déterminer si deux lettres ou deux animaux étaient identiques (Ahr et al., 2016). Dans la condition test, les enfants devaient comparer deux lettres ayant une image en miroir dans un premier temps (*i.e.* amorce) puis deux animaux similaires présentés en miroir (*i.e.* cible ; *c.f.* Figure 7). Dans la condition contrôle, les enfants devaient comparer deux lettres n'ayant pas d'image en miroir (*e.g.* f/t), puis comparer deux animaux identiques présentés en miroir. Les auteurs s'attendaient

donc à ce que les enfants mettent plus de temps ou fassent plus d'erreurs pour comparer les animaux présentés en miroir après avoir inhibé la généralisation en miroir (*i.e.* l'heuristique visuelle), par rapport à une situation où ils n'utilisaient pas cette généralisation en miroir. C'est ce que les auteurs ont observé : il existe un effet d'amorçage négatif mettant en avant le besoin d'inhiber la généralisation en miroir pour comparer deux lettres ayant une image en miroir. Cependant, l'amplitude de cet effet ne varie pas en fonction de l'âge des enfants (Ahr et al., 2016). Ce résultat suggère donc que l'inhibition de la généralisation en miroir serait efficiente dès la fin du CP, âge auquel les enfants entrainent leur lecture de façon intense. L'amorçage négatif a également été observé chez les adultes où on observe encore cet effet, alors même que ces derniers sont des lecteurs experts (Borst, Ahr, et al., 2015). L'inhibition de la généralisation en miroir serait donc nécessaire tout au long de la vie, et ce dès l'apprentissage de la lecture, pour reconnaître des lettres ayant une image en miroir, même lorsque ces dernières sont intégrées à des pseudo-mots (Brault Foisy et al., 2017).

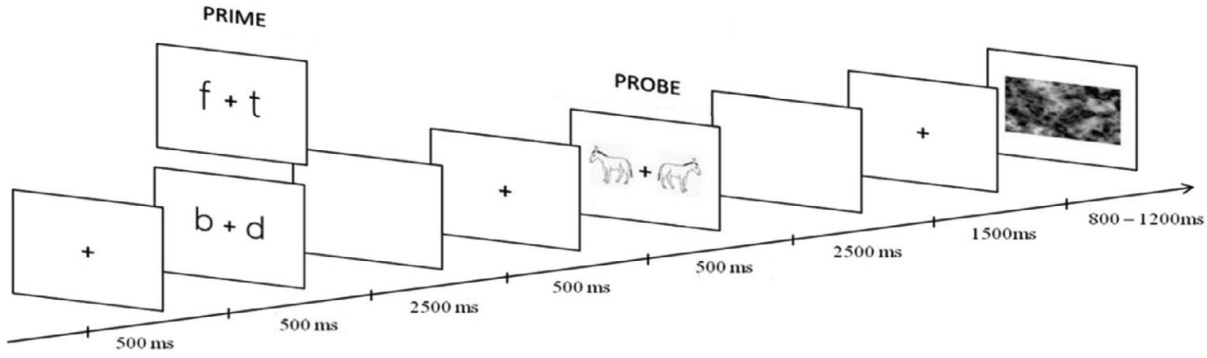


Figure 7. Les enfants seraient plus lents pour déterminer que deux animaux présentés en miroir sont identiques après avoir comparé deux lettres en miroir, plutôt que deux lettres n'ayant pas d'image en miroir (Ahr et al., 2016).

Concernant le besoin de CI à l'écrit, une étude utilisant le paradigme d'amorçage négatif s'est intéressée à l'implication du CI dans la conjugaison de verbe et les accords sujet-verbe (Lanoë, Vidal, Lubin, Houdé, & Borst, 2016). Les auteurs sont partis du constat que les enfants automatisaient les règles de conjugaison et que très rapidement, ils ne faisaient plus d'erreur dans les accords simples entre le sujet et le verbe d'une phrase. Cependant, il arrive parfois que

dans certains contextes linguistiques, cette automatisation pousse les enfants et les adultes à faire des erreurs de conjugaison (Largy, Dédéyan, & Hupet, 2004). Ces erreurs apparaissent principalement lorsque la phrase est construite de cette façon : Sujet + Pronom + Verbe, et que le Pronom est au pluriel. Ainsi, les personnes auraient tendance à écrire « Je les manges » plutôt que « je les mange » car elles utiliseraient la stratégie de conjugaison surapprise « après les je mets un s ». Les auteurs ont alors utilisé un paradigme d'amorçage négatif afin de savoir si ces erreurs de conjugaison ont un lien ou non avec la capacité à inhiber cette stratégie trompeuse (*i.e.* un raccourci ou une heuristique orthographique). Pour cela, des enfants, des adolescents et des adultes devaient utiliser cette stratégie alors qu'ils l'avaient précédemment inhibée dans une condition test, ou l'utiliser alors qu'elle n'avait pas été précédemment sollicitée dans une condition contrôle (*c.f.* Figure 8). Les résultats de l'étude ont alors montré un effet d'amorçage négatif chez les enfants, les adolescents et les adultes. Conjuguer convenablement lorsqu'un pronom pluriel se trouve entre le sujet et le verbe d'une phrase demande donc l'intervention du CI pour inhiber une stratégie surapprise qui est d'accorder le verbe en nombre (*i.e.* singulier ou pluriel) avec le nom le précédant (Lanoë et al., 2016). Comme pour la lecture, c'est donc dans des cas très précis d'erreurs génériques que le CI est requis.

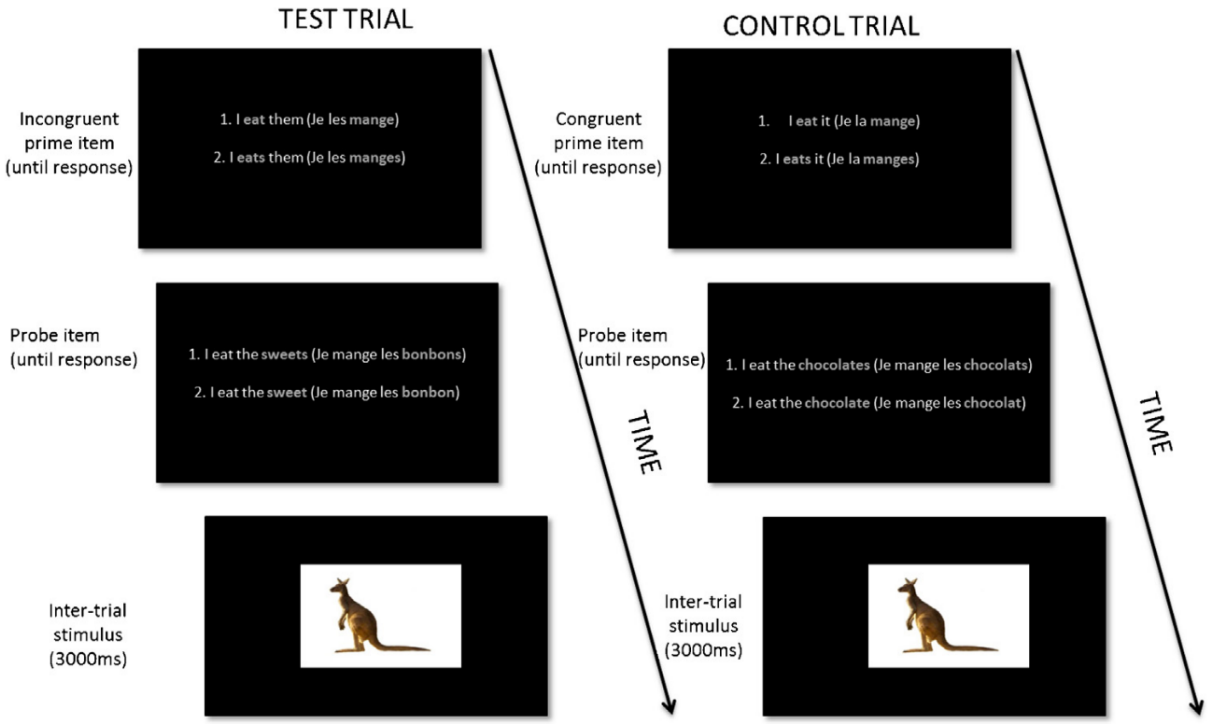


Figure 8. Les enfants, les adolescents et les adultes mettent plus de temps à utiliser l'heuristique « après les je mets un s », quand cette stratégie a précédemment dû être inhibée (Lanoë et al., 2016).

2. Compter

Apprendre à compter et à utiliser les symboles mathématiques est difficile pour de nombreux enfants et adultes. Pour cela, les chercheurs ont tenté de mieux comprendre les processus cognitifs impliqués dans les mathématiques. Les FE ont alors été mises en avant pour leur implication dans l'apprentissage et l'utilisation des mathématiques ((Bull & Lee, 2014; Cragg & Gilmore, 2014; Houdé & Guichart, 2001). Lorsqu'on se penche plus spécifiquement sur le CI, on observe que ce dernier a des liens avec les mathématiques. Dans une étude de 2004, les FE d'enfants d'âge préscolaire ainsi que leurs compétences en mathématiques ont été mesurées et les auteurs ont relevé que le CI contribuait fortement aux compétences précoces en mathématiques des jeunes enfants (Espy, McDiarmid, Cwik, Meade Stalets, et al., 2004). Ce rôle du CI dans les compétences en mathématiques a également été retrouvé chez des enfants

âgés de 11 ans (St Clair-Thompson & Gathercole, 2006). Enfin, une étude transversale menée avec des participants de 8 à 21 ans a montré une relation stable au fil des années entre le CI et les compétences mathématiques (Cragg, Keeble, Richardson, Roome, & Gilmore, 2017).

Afin d'étoffer notre propos, nous avons souhaité présenter deux exemples où le CI est requis : la tâche piagétienne de conservation du nombre et la comparaison de fractions. Tout d'abord, rappelons que selon Piaget les capacités numériques ne se mettent réellement en place dans le cerveau qu'à partir de 7-8 ans (*i.e.* opérations concrètes et réversibles), quand les enfants réussissent la tâche de conservation du nombre (Piaget, 1952). Lorsque l'on présente deux rangées de jetons contenant le même nombre de jetons mais de longueurs différentes (après que les jetons d'une rangée aient été écartés), les enfants n'ayant pas encore acquis la conservation du nombre répondent que la rangée visuellement plus longue contient plus de jetons que la plus courte. Selon Dempster, cet échec de l'enfant ne serait pas lié à un manque de capacités logico-mathématiques, mais plutôt à un défaut de résistance à une interférence (Dempster, 1995). Houdé fait parallèlement la même analyse (Houdé, 1995). En effet, dans cette tâche l'échec des enfants serait causé par un manque d'inhibition de la stratégie visuo-spatiale trompeuse « longueur = nombre » (Houdé, 1997a, 2000). Afin d'observer si ce besoin d'inhibition persiste lorsque les enfants réussissent la tâche, et donc si l'inhibition de l'heuristique « longueur = nombre » est requise pour réussir, une étude de 2001 a adapté le paradigme d'amorçage négatif à la tâche de conservation du nombre avec des enfants de 9-10 ans, soit en CM1 (Houdé & Guichart, 2001). Dans la condition test, les enfants devaient déterminer si deux rangées de longueur différente, mais comportant le même nombre d'items (*i.e.* situation incongruente), étaient identiques en nombre ou non, puis comparer le nombre de jetons de deux rangées présentées de façon congruente où l'heuristique « longueur = nombre » fonctionnait. Dans la condition contrôle, les deux paires d'items n'étaient pas associées. Les résultats de l'étude ont alors montré un effet d'amorçage négatif entre les conditions test et contrôle : inhiber la

stratégie heuristique dans la tâche adaptée de Piaget, et ensuite l'utiliser demande un temps de réponse plus grand qu'utiliser une heuristique sans avoir dû l'inhiber précédemment. Cette étude montre donc que même lorsque l'enfant dispose de compétences mathématiques suffisantes, le CI est requis pour réussir la tâche de conservation du nombre (Houdé & Guichart, 2001).

Pour le second exemple, nous avons choisi une compétence prédictive de la réussite en mathématiques : la compréhension des fractions (Jordan et al., 2013; Siegler, Thompson, & Schneider, 2011). L'apprentissage des fractions est difficile pour les élèves (Lortie-Forgues, Tian, & Siegler, 2015), mais son utilisation reste également compliquée pour les adultes (Vamvakoussi, 2015). Ces difficultés seraient dues à différents facteurs, et notamment l'application des propriétés des nombres entiers lors d'opérations arithmétiques entre fractions (Siegler, Fazio, Bailey, & Zhou, 2013). Cette tendance à appliquer les propriétés des nombres entiers aux nombres rationnels est appelée le « biais du nombre entier » (*i.e. whole number biais*) (Ni & Zhou, 2005). Les enfants et les adultes auraient ainsi tendance à utiliser la stratégie « la fraction ayant les composants les plus grands est la plus grande » (Van Dooren, Lehtinen, & Verschaffel, 2015). Elle serait aussi à l'origine de la difficulté à comparer deux fractions lorsque ces dernières ont un numérateur commun (*e.g.* lorsque l'on demande à des enfants de comparer 3/7 et 3/5, ils ont tendance à répondre que 3/7 est plus grand que 3/5 car 7 est plus grand que 5). Réussir à comparer deux fractions nécessiterait donc, dans ce cas, d'inhiber le biais du nombre entier. Pour connaître l'implication du CI dans la comparaison de fractions, des auteurs ont adapté un paradigme d'amorçage négatif à ce type de tâche (Rossi, Vidal, Letang, Houdé, & Borst, 2019). Pour cela, ils ont comparé deux conditions : la condition test où les participants peuvent utiliser leur biais du nombre entier (*i.e.* comparer deux fractions avec des dénominateurs communs) alors qu'ils viennent de l'inhiber (*i.e.* comparer deux fractions avec des numérateurs communs) et la condition contrôle où les participants utilisent

leur biais du nombre entier après avoir fait une comparaison n'impliquant pas ce biais (*i.e.* dire quelle fraction avait un dénominateur plus grand que son numérateur) (*c.f.* Figure 9). L'étude a révélé qu'il existe un effet d'amorçage négatif chez les adolescents et chez les adultes démontrant ainsi un besoin d'inhibition dans la comparaison de fractions, et ce, indépendamment de l'âge des participants (Rossi et al., 2019). Ce résultat a également été observé dans la comparaison d'autres nombres rationnels, les nombres décimaux (Roell, Viarouge, Houdé, & Borst, 2019). En effet, les adolescents et les adultes ont également recours à l'inhibition du biais du nombre entier pour déterminer que 1,352 est plus petit que 1,7 (*i.e.* pour éviter le biais très tentant selon lequel 352 > 7).

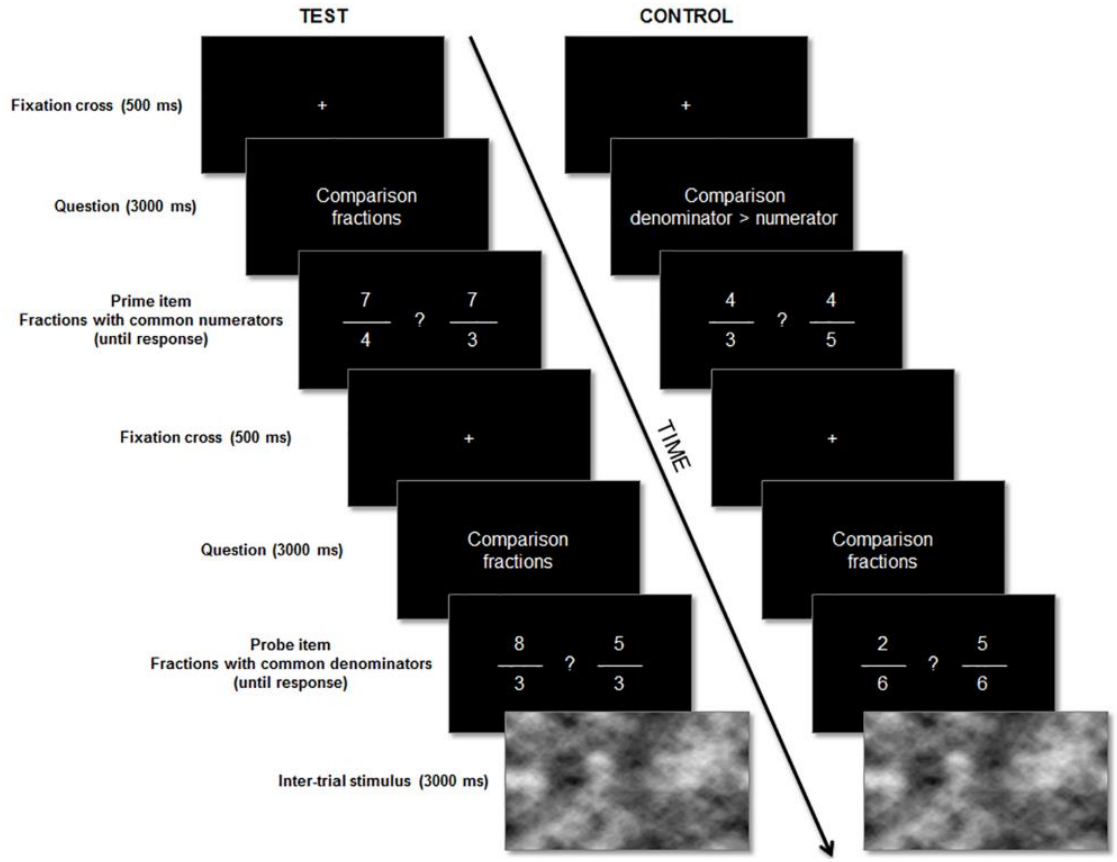


Figure 9. Les adolescents et les adultes mettent plus de temps à comparer deux fractions ayant des dénominateurs communs lorsqu'ils ont précédemment comparé des fractions avec des numérateurs communs (condition test), plutôt que déterminer quelle fraction a un dénominateur plus grand que son numérateur (condition contrôle) (Rossi et al., 2019).

3. Penser ou raisonner

Depuis Piaget, on considère que le développement cognitif culmine dans la pensée logique formelle, considérée comme cruciale pour l'adaptabilité humaine (Piaget, 1954). Selon ce dernier, les compétences se développeraient donc au fil des différents stades déjà évoqués. Cependant, les études ultérieures à Piaget, et notamment celles de Houdé, ont montré que souvent les incompétences des enfants ne seraient pas liées à un manque de connaissances logiques ou conceptuelles, mais plutôt à un défaut d'inhibition (Houdé, 1997b, 2000, 2019a, 2020a). Ainsi réussir certaines tâches de raisonnement nécessiterait l'intervention du CI. C'est ce que nous avons souhaité présenter dans les deux exemples suivants : l'un sur la tâche piagétienne emblématique de l'inclusion des classes, et l'autre sur le raisonnement déductif.

La tâche d'inclusion des classes est un paradigme classiquement utilisé pour étudier le développement du raisonnement logique dans le domaine de la catégorisation. Dans cette tâche, on présente, par exemple, à des enfants un bouquet de 10 marguerites et de 2 roses et on leur demande de déterminer s'il y a plus de fleurs ou plus de marguerites. Il est observé classiquement qu'avant 7 ans, les enfants échouent à la tâche et répondent qu'il y a plus de marguerites que de fleurs (Inhelder & Piaget, 1964). Cette erreur serait due à l'utilisation d'une stratégie perceptive de comparaison des deux sous-classes (*i.e.* les marguerites *vs.* les roses) plutôt qu'une stratégie logique d'inclusion leur permettant de comparer l'ensemble à une sous-classe (*i.e.* les fleurs *vs.* les marguerites). Pour réussir, il semble donc nécessaire d'inhiber cette première stratégie, intuitive car habituelle, au profit de la seconde (Houdé, 1992, 1995, 2000; Perret, Paour, & Blaye, 2003). Afin de mesurer ce besoin de CI dans la tâche d'inclusion, un paradigme d'amorçage négatif a été proposé à des enfants de 7 à 11 ans (Perret et al., 2003). Ces derniers ont été répartis au sein de deux niveaux de connaissances (inclusion de classes acquise ou en cours d'acquisition) afin de connaître l'implication du CI, en fonction du niveau des élèves. Les auteurs observent alors l'existence d'un effet d'amorçage négatif chez les élèves

et ajoutent que ce dernier est d'autant plus fort chez les enfants qui n'ont pas totalement acquis l'inclusion des classes, par rapport aux enfants qui l'ont acquise (Perret et al., 2003). Cela suggère donc qu'avec le temps et l'acquisition de connaissances, nous aurions moins besoin de notre CI pour inhiber la stratégie perceptuelle de comparaison des sous-classes. Une seconde étude, complémentaire à celle-ci, a exploré le besoin de CI d'enfants et d'adultes à cette tâche d'inclusion des classes (Borst, Poirel, Pineau, Cassotti, & Houdé, 2012a). Les auteurs ont comparé deux situations. L'une où le participant devait comparer deux sous-classes, alors même qu'il venait d'inhiber cette stratégie pour comparer une sous-classe et son ensemble (*i.e.* la condition test similaire à Piaget) ; l'autre où il devait comparer deux sous-classes alors qu'il avait précédemment répondu à une question n'impliquant pas cette stratégie (*e.g.* « est-ce que les items ont des couleurs différentes ? » ; la condition contrôle) (*c.f.* Figure 10). Les résultats de l'étude confirment ceux de Perret et al. (2003) et montrent un effet d'amorçage négatif chez les enfants, mais aussi chez les adultes. Cela suggère donc que le besoin d'inhibition serait toujours présent alors même que l'inclusion de classe est maitrisée depuis plusieurs années (Borst et al., 2012a). Si l'on fait une synthèse de ces données sur le rôle du CI dans l'inclusion des classes et celles évoquées précédemment dans la conservation du nombre (Houdé & Guichart, 2001) avec le même paradigme d'amorçage négatif, on mesure combien la théorie et les tâches logico-mathématiques de Piaget sont revisitées à l'aune de modèles et de processus cognitifs nouveaux (sachant que pour Piaget l'inclusion et la conservation relevaient d'une même structure logique).

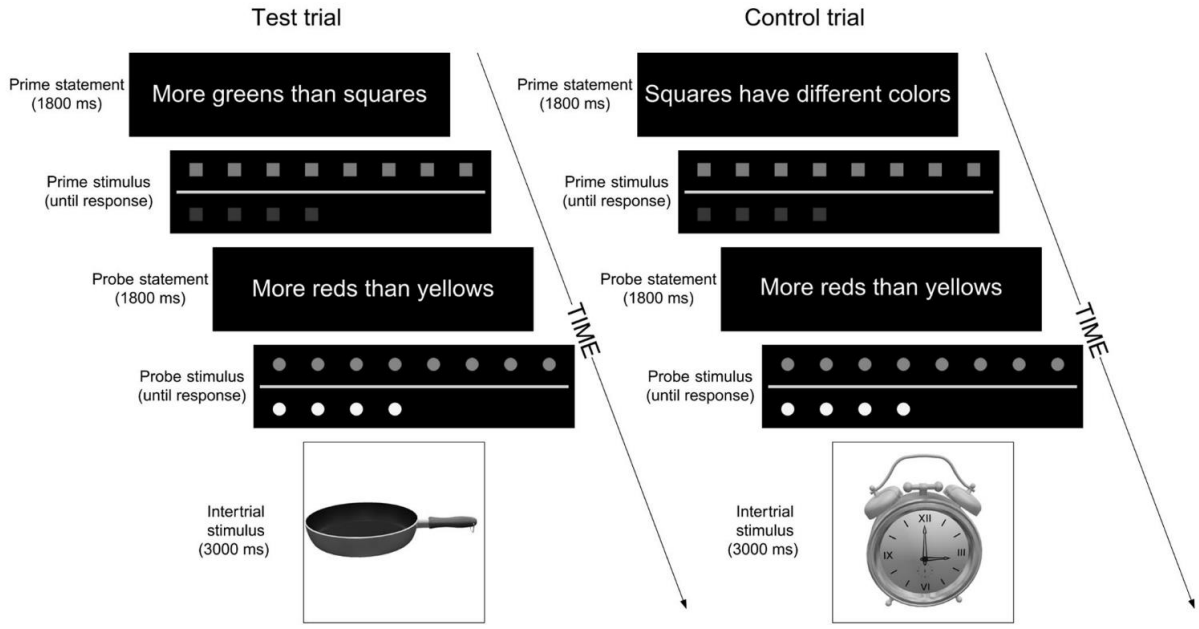


Figure 10. Les enfants et les adultes mettent plus de temps pour comparer une sous-classe et son ensemble après avoir comparé deux sous-ensembles, plutôt qu'avoir répondu à une question sur la couleur des objets (Borst et al., 2012a)

Concernant le raisonnement déductif, Piaget considère qu'avant le stade des opérations formelles, ce dernier ne peut être acquis (Piaget, 1984). Le raisonnement déductif consiste à tirer une conclusion valide à partir d'un ensemble de prémisses. Il est classiquement illustré par les syllogismes (depuis Aristote) en trois phrases avec deux phrases prémisses (les deux premières) et une conclusion (la troisième phrase) : « Tous les hommes sont mortels. Socrates est un homme. Donc Socrate est mortel ». Le raisonnement déductif est l'opération cognitive de discernement des liens entre les prémisses et de déduction de la conclusion. Mais il arrive parfois que la logique déductive soit contrefactuelle, comme par exemple : « Les éléphants sont des mangeurs de foin. Tous les mangeurs de foin sont légers. Donc les éléphants sont légers. ». Dans ce cas, la conclusion est valide du point de vue de la logique déductive, cependant le côté inattendu et contrefactuel de cette conclusion induit les personnes en erreur. Il existe donc un biais de croyance « incroyable = incorrect et l'inverse » (Evans, 1989; Evans, Barston, & Pollard, 1983; Evans & Perry, 1995; Houdé, 2000). Afin de connaître l'implication du CI dans le raisonnement déductif avec des syllogismes, un paradigme d'amorçage négatif a été utilisé

chez des enfants de 7 à 10 ans (Moutier, Plagne-Cayeux, Melot, & Houdé, 2006). Pour cela, les enfants devaient indiquer si la conclusion du syllogisme était logique, valide, ou non vis-à-vis des deux prémisses. Dans la condition test, les enfants devaient répondre à un syllogisme où la réponse logique était en accord avec leurs croyances habituelles (*e.g.* Tous les éléphants sont des mangeurs de foin. Aucun mangeur de foin n'est léger. Tous les éléphants sont légers. → Faux), alors même qu'ils avaient dû l'inhiber précédemment (*e.g.* Les éléphants sont des mangeurs de foin. Tous les mangeurs de foin sont légers. Les éléphants sont légers. → Vrai). Dans la condition contrôle, les deux types d'items étaient inversés. Les résultats de l'étude ont montré un effet d'amorçage négatif symbolisant le coût du CI dans ce type de tâche, alors même que les enfants obtenaient la bonne réponse (Moutier et al., 2006).

4. Respecter autrui et « vivre ensemble »

Respecter autrui est une capacité importante pour développer des interactions sociales positives aves les pairs. Pour cela, il est essentiel de considérer l'autre comme notre égal, mais aussi de réussir à prendre sa perspective. Cependant, il arrive parfois qu'il soit difficile d'adopter la perspective d'une autre personne que soi-même. Cela s'observe notamment dans la tâche de *Own body transformation* où la consigne est de déterminer dans quelle main un personnage présenté de dos (*i.e.* perspective à la première personne, égocentrique) ou de face (perspective à la troisième personne, adoptant celle de quelqu'un d'autre) tient une balle colorée. Les données montrent que les enfants et les adultes ont besoin de plus de temps et sont moins performants lorsqu'ils doivent adopter le point de vue d'autrui plutôt que le leur (Blanke et al., 2005; Crescentini, Fabbro, & Urgesi, 2014). L'une des explications de cette difficulté serait qu'adopter la perspective de quelqu'un d'autre que soi demanderait l'intervention du CI pour inhiber sa propre perspective, inhiber le biais égocentrique, ce qui est en fait difficile à

tous les âges, mais en particulier chez l'enfant. Afin de tester cette hypothèse, une étude a adapté le paradigme d'amorçage négatif à cette tâche de prise de perspectives (Aïte et al., 2016). Pour cela, des enfants de 10 ans et des adultes ont répondu à deux types de paires d'items (*c.f.* Figure 11). Dans la condition test, les participants devaient dans un premier temps déterminer dans quelle main un personnage de face tenait une balle (*i.e.* phase d'inhibition), puis déterminer dans quelle main un personnage de dos tenait une balle (*i.e.* phase de désinhibition et d'amorçage négatif). Les participants devaient donc utiliser leur propre perspective qu'ils avaient précédemment inhibée. Dans la condition contrôle, les participants devaient déterminer de quel côté de l'écran se situait une balle, puis déterminer dans quelle main un personnage de dos tenait une balle. Les participants devaient donc utiliser leur propre perspective sans l'avoir inhibée dans un premier temps. Les résultats de l'étude ont montré un effet significatif d'amorçage négatif chez les enfants et chez les adultes montrant le rôle du CI dans la réalisation de cette tâche. Ainsi, l'inhibition de notre propre perspective serait nécessaire pour adopter le point de vue d'autrui, et ce d'autant plus chez les enfants que les adultes (Aïte et al., 2016). Or ce processus de décentralisation sociale, via le CI, est essentiel au respect d'autrui et au vivre ensemble. Piaget en avait fait un stade, l'égocentrisme, avant 6 ans (Piaget & Inhelder, 1948).

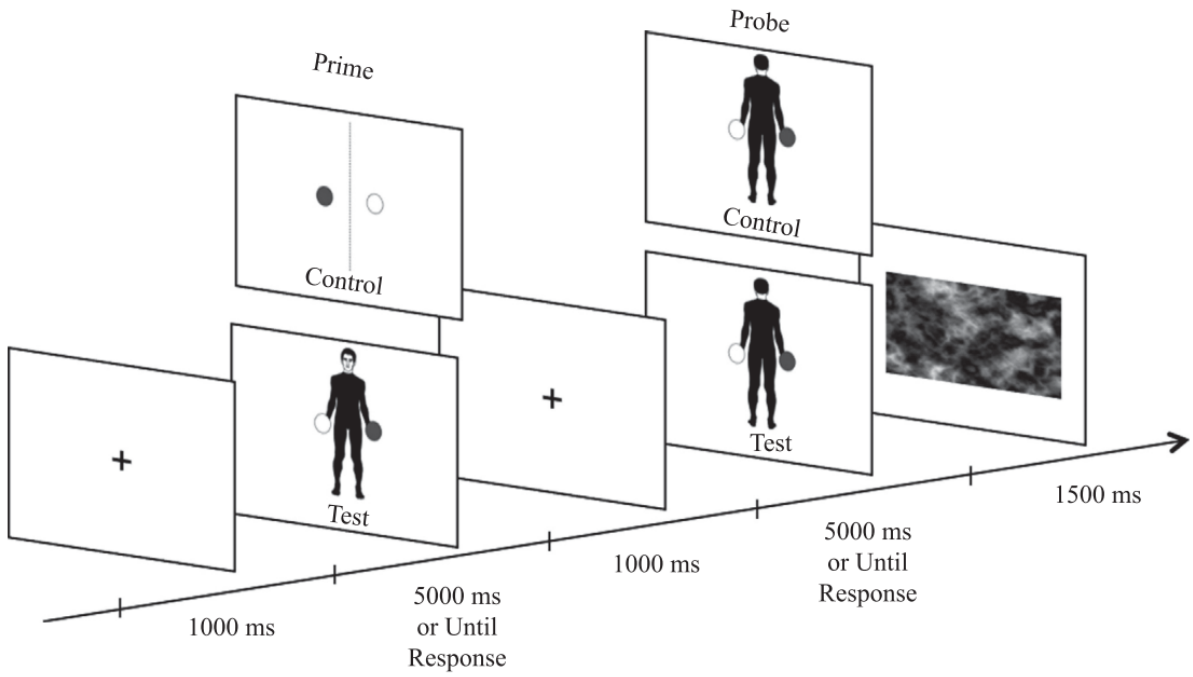


Figure 11. Les enfants et les adultes mettent plus de temps à utiliser leur propre perspective lorsqu'ils ont précédemment adopté celle d'autrui, par rapport à une situation où ils ont précédemment déterminé la localisation d'une balle colorée (Aïte et al., 2016).

II. Entrainer le contrôle inhibiteur des élèves

1. Les points clés d'un entrainement

Il existe plusieurs facteurs déterminant l'efficacité d'un entraînement, la plupart étant dépendants des objectifs de la recherche. La durée de l'entrainement en est un (Diamond & Ling, 2016). En comparant des entrainements informatisés de durées différentes (entre 2 et 14 semaines), les auteurs ont constaté que plus ce dernier était long, plus les résultats étaient importants, ce qui paraît cohérent d'un point de vue pédagogique (avec une fréquence et une durée de séances constantes) (Diamond & Ling, 2016).

Dans un second temps, on remarque que les bénéfices d'un entrainement sont liés à la difficulté de la tâche entraînée. Cette dernière doit être adaptée aux participants tout au long de

l'expérimentation (Diamond & Lee, 2011; Diamond & Ling, 2016; Green & Bavelier, 2008). Lorsque l'entrainement débute, les compétences des participants s'améliorent graduellement, rendant la réalisation de la tâche plus aisée. Ainsi, si la difficulté de cette dernière reste identique, au fil des essais, le besoin cognitif pour la réaliser sera moins grand pour le participant et l'ennui peut s'installer. A l'inverse, les participants ne pourront réussir une tâche si elle est trop difficile pour eux. Dans chacun de ces cas, les participants se désinvestiront de la tâche et leur motivation déclinera (Diamond, 2012). Un juste équilibre est donc nécessaire pour engager suffisamment les ressources cognitives du participant sans frustration : c'est ce qu'on appelle la « zone d'engagement optimal » (Plass, Homer, Pawar, Brenner, & MacNamara, 2019). Cela rejoint les intuitions des grands pédagogues telle que Maria Montessori qui préconisait de proposer aux enfants des tâches un peu difficiles sans qu'elles excèdent trop leurs possibilités (Houdé, 2021). Ni trop faciles, ni trop difficiles pour ancrer la curiosité et le progrès (Gottlieb, Oudeyer, Lopes, & Baranes, 2013)

Une variabilité des stimuli, des modalités de réponses et des tâches est également un point-clé dans l'efficacité d'un entrainement. Cela permet de maintenir la motivation du participant et d'éviter l'automaticité des réponses (Enriquez-Geppert, Huster, & Herrmann, 2013; Green & Bavelier, 2008). Aussi, cela permet un effet de généralisation de l'entrainement, et notamment vers les situations quotidiennes (Green & Bavelier, 2008).

Enfin, les études relèvent que la manière dont la pratique est présentée et menée par l'expérimentateur influera sur les bénéfices de l'entrainement (Trulson, 1986). La motivation des participants ainsi que leur stimulation participeront également aux bénéfices de l'entrainement (Green & Bavelier, 2008).

Dans l'objectif d'éviter les effets de test-retests, il est essentiel de comparer les bénéfices obtenus par le groupe d'intérêt à ceux obtenus par un groupe n'ayant pas participé à l'entrainement, un groupe contrôle (Houdé, 2007; Jolles & Crone, 2012). Ce groupe contrôle

peut être de deux types : actif ou non. Lorsqu'on utilise un groupe contrôle non-actif, ce dernier réalise uniquement les évaluations de pré et post-test. Cela permet de contrôler les effets de familiarité d'évaluation, mais cette option ne prend pas en compte les effets d'attente et de motivation. C'est pour cela que la mise en place d'un groupe contrôle actif est plus intéressante (Diamond & Ling, 2016). Ce dernier groupe recevra, en plus des évaluations, un entrainement placebo, c'est-à-dire n'entrainant pas le processus d'intérêt. Idéalement, l'entrainement placebo et la présentation du projet aux participants doivent créer une même motivation et une même attente de progrès que les participants du groupe d'intérêt ou groupe expérimental (Boot, Simons, Stothart, & Stutts, 2013; Stothart, Simons, Boot, & Kramer, 2014).

2. Les effets de transfert proche et lointain

Etudier le transfert d'un entrainement, proche ou lointain, à des situations non-entraînées ou à des situations réelles, quotidiennes, à l'école par exemple, est un aspect critique pour évaluer la généralisation du bénéfice d'un entrainement. En effet, le but ultime d'un entrainement n'est pas d'améliorer ses compétences sur la tâche entraînée (sauf quelques fois pour la musique et le sport par exemple), d'autant plus lorsque celle-ci est une tâche informatisée de laboratoire, mais bien de renforcer ses compétences cognitives ou ses compétences dans une tâche quotidienne (*e.g.* les apprentissage scolaires) (Zhao, Chen, Fu, & Maes, 2015). De plus, les effets de transfert permettent également d'identifier et mieux comprendre les processus cognitifs sous-jacents qui se modifient dans le cerveau à la suite de l'entrainement (Jolles & Crone, 2012). Pour autant, l'idée que l'entrainement d'une capacité cognitive puisse améliorer les performances d'autres capacités non-entrainées est très controversée.

Certains auteurs mettent en avant le modèle de la force (*i.e.* strenght model) qui suggère que l'entrainement du CI provoquerait un renforcement de ce dernier, tout comme un muscle suite à un entrainement physique (Beauchamp, Kahn, & Berkman, 2016). Ainsi, en entrainant le CI à plusieurs reprises, on construit le « muscle » du CI (ou du cortex pré-frontal), ce qui le rend plus grand et plus robuste. Par conséquent, un entrainement spécifique du CI pourrait ensuite se transférer à toutes les tâches impliquant ce « muscle ». La pratique provoquerait donc une amélioration transférable en raison du développement d'une ressource partagée (Beauchamp et al., 2016). Dans ce sens, plusieurs études ont montré un transfert de compétences lorsque ces dernières partagent des processus cognitifs similaires, comme par exemple l'effet d'un entrainement au CI sur des tâches demandant également du CI (*e.g.* Ghodrati, Askari Nejad, Sharifian, & Nejati, 2019; Zhao, Chen, & Maes, 2016). C'est ce qu'on appelle le transfert proche. D'autres études ont également montré qu'un transfert plus lointain était possible, c'est-à-dire un transfert de capacités à d'autres ne faisant pas partie du même domaine que celui de la tâche entrainée (*e.g.* (Aydmune et al., 2019; Houben, Havermans, Nederkoorn, & Jansen, 2012). C'est par exemple le cas d'un entraînement au CI se transférant aux capacités de MdT et d'intelligence fluide chez les enfants de 6 à 8 ans (Aydmune et al., 2019), ou bien un entrainement au CI se transférant aux capacités de lecture d'enfants de 8-11 ans (Johann & Karbach, 2019). Néanmoins, d'autres auteurs n'ont pas retrouvé ces transferts lointains (Talanow & Ettinger, 2018; Thorell, Lindqvist, Nutley, Bohlin, & Klingberg, 2009; Wang, Li, Gai, & Cao, 2020).

Il existe donc dans la littérature un manque de consistance sur les effets de transfert d'un entrainement, et d'autant plus lorsqu'il s'agit des effets de transferts lointains (Diamond, 2012; Diamond & Ling, 2016; Rossignoli-Palomeque, Perez-Hernandez, & González-Marqués, 2018). Ces résultats contradictoires s'expliquent notamment par les différences en termes

d'intensité, de durée et de type d'entrainement, ainsi que par la méthodologie utilisée (Karbach & Unger, 2014).

3. La stabilité temporelle d'un entrainement

Lorsqu'on entraîne une capacité cognitive, il est important que les bénéfices se transfèrent, de façon proche ou lointaine, mais il est tout aussi essentiel que ces derniers se maintiennent dans le temps lors des post-tests immédiats ou différés. Il est donc important d'utiliser une évaluation de suivi, plusieurs semaines, mois, voire années après la fin de l'entrainement. Cela permettra d'en observer les bénéfices à long terme, mais aussi d'en tester les effets secondaires (*e.g.* une motivation ou une capacité d'apprentissage accrue) qui nécessitent parfois du temps pour s'établir (*e.g.* une meilleure performance scolaire) (Jolles & Crone, 2012). Ainsi, certaines études mettent en avant les bénéfices d'un entrainement au CI sur plusieurs mois (*e.g.* Aydmune et al., 2019; Zhao et al., 2016), bien que les bénéfices de ce dernier diminuent lorsqu'il s'arrête (Diamond & Ling, 2016).

4. Les différentes approches d'un entrainement

En fonction du but de l'étude, il existe de nombreuses approches d'entrainement dans la littérature (Jolles & Crone, 2012). Cependant les auteurs s'accordent pour en différencier deux : l'entrainement dit « tâche spécifique » et l'entrainement « basé sur le processus ».

L'entrainement dit « tâche spécifique » est basé sur la stratégie. Dans ce dernier une astuce, une méthode ou une solution est donnée au participant pour qu'il puisse réussir une tâche précise. C'est par exemple le cas de la métacognition lorsqu'elle est appliquée à une tâche spécifique. Dans une étude pionnière centrée sur un apprentissage métacognitif au CI du biais

d'appariement perceptif dans une tâche de raisonnement déductif, les auteurs ont montré que mettre avant un piège à éviter ou inhiber, ici le biais (ou heuristique) de raisonnement perceptif, puis rappeler la règle à suivre pour réussir (*i.e.* l'algorithme de logique déductive) sur une première tâche permettait un transfert proche des bénéfices sur une seconde tâche analogue de raisonnement déductif chez les adultes (Houdé, 2007; Houdé & Moutier, 1996) mais aussi chez les enfants de 10-11 ans (Moutier, 2000). Une autre étude a proposé un entrainement informatisé ciblé autour d'une composante du CI (*i.e.* l'inhibition de la réponse) par le biais de l'application sur tablette « Fruit Ninja ». Le principe de ce jeu repose sur le principe du Go/No-Go : les participants doivent découper le plus possible de fruits apparaissant à l'écran, sans pour autant découper les objets distracteurs. Des enfants préscolaires de 4 à 5 ans se sont donc entraînés pendant 3 semaines à raison de 4 sessions de 15 minutes par semaine à ce jeu. Les résultats de l'étude n'ont pas montré d'effet de transfert des bénéfices de l'entrainement en CI ni en MdT (autre FE de nature différente), mais ont cependant montré une amélioration des performances dans la tâche des Matrices Progressives de Raven évaluant l'intelligence fluide (Liu, Zhu, Ziegler, & Shi, 2015).

La seconde approche d'entrainement se centre plutôt sur le processus. Dans ce cas l'entrainement cible non pas une tâche particulière, mais plutôt une fonction plus générale (*e.g.* une FE particulière telle que le CI). C'est ce qu'ont fait Diamond et son équipe en proposant un entrainement aux FE, intégré aux activités de la classe, tout au long d'une année scolaire chez des enfants d'âge préscolaire (Diamond et al., 2007). Cet entrainement, comparé au programme scolaire proposé par le ministère de l'Éducation canadien principalement centré sur l'alphabétisation, utilisait différentes activités soutenant les FE telles que l'utilisation de la parole autorégulatrice (dans une perspective vygotskienne), du jeu dramatique ou d'aides externes. Les résultats de l'étude ont montré un transfert des bénéfices de l'entrainement sur les FE (*i.e.* CI et MdT) des enfants d'âge préscolaire et ont montré que cette amélioration était

d'autant plus forte lorsque les tâches d'évaluation requéraient un coût exécutif fort (Diamond et al., 2007). Enfin, dans une étude plus récente, des auteurs ont mis en avant un entrainement informatisé nommé « PARISA » composé de six situations ludiques et adaptatives entraînant les trois composantes du CI chez les enfants de 6 ans (Ghodrati et al., 2019). Cet entrainement de 10 séances de jeux centrées sur le CI a permis de montrer une amélioration des performances sur des tâches non-entrainées évaluant le CI. Un transfert proche était donc observé (Ghodrati et al., 2019).

L'utilisation de ces deux approches d'entrainement est principalement basée sur l'objectif de l'étude, cependant, un second argument peut également rentrer en considération : la recherche de transfert. En effet, les études précédentes montrent que les entrainements basés sur le processus permettent une généralisation plus large et donc un transfert des bénéfices, par rapport aux entrainements basés sur la stratégie qui visent à améliorer une compétence particulière (*e.g.* une compétence scolaire) (Jolles & Crone, 2012).

5. Les différents formats d'un entrainement

Les deux approches d'entrainement précédemment exposées peuvent être expérimentées dans deux formats différents : informatisés ou non.

Les entrainements informatisés sont ceux que l'on retrouve le plus dans la littérature (Zhao et al., 2015). La raison principale est que les tâches informatisées permettent de s'adapter à la performance du participant en temps réel, et donc d'adapter la difficulté de la tâche afin que celle-ci reste engageante tout au long de l'entrainement (Best, 2010). Un entrainement à l'inhibition de la réponse mené chez des enfants de 10-12 ans a proposé une tâche informatisée de Go/No-Go dont la difficulté s'adaptait au niveau du participant à chaque session. L'entrainement se déroulant durant 4 semaines à raison de 5 séances de 20 minutes par semaine,

a montré un transfert proche des bénéfices de l'entraînement à une tâche non-entrainée de CI (*i.e.* la tâche de Stroop mesurant le contrôle des interférences), ainsi qu'un transfert lointain en flexibilité cognitive et en mise à jour en MdT. De plus, les auteurs ont observé que les bénéfices de l'entrainement étaient maintenus pour la MdT, et ce, trois mois après la fin de l'entrainement (Zhao et al., 2016). Dans une seconde étude plus récente utilisant un protocole similaire, les auteurs ont évalué un entrainement informatisé au contrôle des interférences, avec une tâche de Stroop-like, où la difficulté de la tâche était adaptée aux participants à chaque session. Les auteurs ont montré un transfert des bénéfices de l'entrainement à une tâche non-entrainée de contrôle des interférences (*i.e.* tâche de Flanker), d'inhibition de la réponse (*i.e.* Go/No-Go) et de mise à jour en MdT. Cependant, ces effets de transferts proches et lointains n'avaient pas de stabilité à long terme, puisqu'on ne les observaient plus 3 mois après l'intervention (Zhao & Jia, 2018).

Par ailleurs, il est possible de différencier deux formes d'entrainements informatisés : les entraînements gamifiés ou non. Les aspects motivationnels ayant montré leur impact dans les bénéfices des apprentissages, une étude de 2019 s'est intéressée à comparer différents entrainements aux FE, gamifiés ou non chez des enfants de 8 à 11 ans (Johann & Karbach, 2019). Les auteurs ont donc construit six entrainements : deux pour chaque FE, l'un était gamifié, c'est-à-dire que l'entrainement était présenté comme un jeu aux enfants avec une histoire, des personnages, des points magiques à gagner et une mise en décor ; l'autre était un entrainement informatisé classique reposant sur les mêmes items que le premier, mais n'utilisant pas d'histoire, de personnages, de points magiques et de mise en décor. Lorsqu'on regarde les deux entrainements au CI, gamifié ou non, on observe que 4 semaines à raison de 5 sessions de 30 minutes par semaine ont permis une amélioration des performances en CI (sur des tâches non-entrainées). Cependant, seul l'entrainement gamifié a permis un transfert plus

lointain des bénéfices de l'entrainement sur les capacité de compréhension et de rapidité de lecture (Johann & Karbach, 2019).

Le second format d'entrainement, plus rare, est l'entrainement non-informatisé, reposant sur des tâches du quotidien. En effet, il existe peu d'études entrainant le CI dans le contexte d'une tâche écologique. L'une d'entre elles porte sur un entrainement à l'inhibition de la réponse où des élèves de 8 à 12 ans jouaient au jeu « Jacques a dit » (Zhao et al., 2015). Dans ce jeu habituel des cours de récréation, les élèves devaient faire l'action qu'on leur dictait, uniquement si elle était précédée de « Jacques a dit ». Les élèves devaient donc inhiber leur réaction à un ordre de mouvement sans ce préalable. Après sept jours de pratique à raison de 20 minutes par jour, les résultats de l'étude sont mitigés. En effet, les auteurs ont montré un transfert des bénéfices de l'entrainement sur une tâche de Go/No-Go (*i.e.* inhibition de la réponse), mais n'ont pas observé de transfert sur une tâche de Stroop (*i.e.* contrôle des interférences). L'étude a donc montré que l'entrainement par un jeu de récréation dans un contexte scolaire, permettait un transfert, mais que ce dernier était seulement restreint à la composante entraînée du CI. De façon semblable, des auteurs se sont intéressés à l'effet de la pratique d'un art martial sur les capacités de CI. Les arts martiaux traditionnels, tel que le taekwondo, mettent l'accent sur la maîtrise de soi, la discipline et le développement du caractère (Diamond & Lee, 2011). Un entrainement de 36 séances de 45 minutes de taekwondo chez des enfants de 10 ans a permis de montrer une amélioration des performances en inhibition cognitive, en régulation émotionnelle et en comportements prosociaux, ce qui n'était pas le cas pour les enfants pratiquant une activité sportive quelconque (Lakes & Hoyt, 2004). La pratique de cet art martial a donc permis un transfert vers de multiples mesures cognitives et comportementales.

Les études ont mis en avant que les activités quotidiennes telles que les arts martiaux ou les programmes scolaires entraînant différents aspects du CI permettaient des avantages

cognitifs plus répandus que l'entrainement informatisé ciblé sur une tâche bien précise (Diamond & Ling, 2016). De plus, les premiers ont l'avantage d'être moins onéreux que le développement d'un entrainement informatisé (Moreau & Conway, 2014).

III. Conclusion

Ce second chapitre met en lumière le rôle essentiel du CI dans tous les domaines des apprentissages scolaires : lire et écrire, compter, penser ou raisonner et respecter autrui. Comme le supposait Dempster, le développement cognitif n'est pas seulement une acquisition de connaissances, mais également une habilité à inhiber des connaissances antérieures (Dempster, 1995). Ainsi, acquérir une nouvelle notion serait donc le résultat de connaissances théoriques accouplées à une capacité générale d'inhibition de stratégies cognitives concurrentes (Houdé, 1995, 1997b). L'entrainement du CI est donc indispensable, et ce dès le plus jeune âge (Morgan et al., 2019). Que l'entrainement soit basé sur la stratégie dans une tâche ou le processus général, différents aspects sont à prendre en compte pour qu'il soit efficient et se généralise au maximum (Diamond & Ling, 2016). De plus, les bénéfices d'un entrainement écologique seraient plus généralisables et transférables que ceux obtenus par les entrainements informatisés (Diamond & Ling, 2016). Pour autant, on observe que la plupart des études présentées dans ce chapitre ne se déroulent pas dans un contexte scolaire écologique, celui dans la salle de classe, où l'enseignant est impliqué. C'est un biais, un reflet de la littérature actuelle. En effet, il arrive parfois que les enseignants soient engagés dans la réalisation de la recherche, et notamment l'intervention pédagogique (Diamond et al., 2007), mais à notre connaissance, il n'existe aucune étude d'entrainement au contrôle inhibiteur impliquant totalement les enseignants, en tant qu'acteurs principaux d'une recherche participative réalisée par eux dans la salle de classe, de la création du contenu pédagogique jusqu'à son évaluation.

Chapitre 3

Passer du laboratoire à la classe

Le chapitre précédant ayant pointé le manque d'études impliquant des enseignants dans le processus de recherche pour améliorer les apprentissages des élèves, nous souhaitons, dans ce troisième et dernier chapitre, décrire le processus permettant de passer du laboratoire à la classe. En nous appuyant sur les études de recherche participative dans les domaines des sciences naturelles et des sciences humaines et sociales, nous aborderons les étapes nécessaires pour la mise en place d'une recherche participative. Il s'agira également de présenter les différentes formes existantes ainsi que des exemples dans les domaines de la biologie, de l'astronomie ou encore de l'économie. Ensuite, la seconde partie de ce chapitre sera consacrée à l'exposition du cadre de cette thèse. Nous en décrirons le mode de financement, ainsi que Lea.fr, la plateforme numérique et collaborative ayant permis la réalisation de cette thèse à grande échelle. Enfin, nous présenterons la collaboration née en 2017 entre Lea.fr et le LaPsyDÉ, ayant permis un réel aller-retour du laboratoire à la classe.

I. Faire de la recherche participative

1. Qu'est-ce que la recherche participative ?

La recherche participative est une recherche qui fait collaborer des non-chercheurs et des chercheurs dans le but de collecter et analyser de grandes quantités de données (Bonney, 1996; Miller-Rushing et al., 2012). Cela fait référence à l'engagement de non-chercheurs dans des activités de recherche scientifique lorsqu'ils contribuent activement à la science, soit avec leur effort intellectuel ou leurs connaissances, soit avec leurs outils et ressources (Gordienko, 2013). Les non-chercheurs ne sont pas vus comme des objets de recherche, mais comme des co-chercheurs ayant eux aussi une connaissance du sujet traité (Bergold & Thomas, 2012). Il s'agit donc de rapprocher les chercheurs et les non- chercheurs (Irwin, 1995; Lefrançois, 1997) en faisant de la recherche « avec » plutôt que « sur » (Lieberman, 1986). C'est une stratégie planifiée d'investigation et d'intervention qui se développe dans des expériences concrètes impliquant activement les acteurs dans la production de la connaissance (Anadon, 2013; Lefrançois, 1997). Il s'agit également d'une stratégie d'intégration des connaissances théoriques et pratiques, dont le but est d'accroître le niveau de compétence des partenaires et de compréhension d'une problématique multiple et complexe en vue d'y apporter des solutions novatrices, efficaces et efficientes (Lefrançois, 1997). La recherche participative permet donc d'améliorer la culture scientifique et l'intérêt pour la science des non- chercheurs, ainsi que de les informer sur des sujets précis (*e.g.* le changement climatique, l'écologie des papillons…) (Lowman, D'Avanzo, & Brewer, 2009). On ressent aujourd'hui que cette approche est dans « l'air du temps », en raison du lien de confiance à restaurer entre les chercheurs et les non-chercheurs ; en raison aussi du désir d'action des non-chercheurs pour coconstruire avec les chercheurs tout à la fois la connaissance, la conscience et la maîtrise du monde de demain, qu'il s'agisse d'environnement, de santé ou d'éducation.

Il existe de nombreux termes pour désigner la recherche participative selon le domaine des savoirs dans lequel elle s'inscrit : recherche-action, recherche-action participative, recherche citoyenne, recherche-intervention, recherche-formation, recherche collaborative, recherche impliquée… Quelles que soient les appellations, toutes ces recherches ont le même objectif d'inclure des non-chercheurs dans la construction de connaissances scientifiques, promouvoir la production collective des connaissances et son analyse critique (Anadon, 2013; Bergold & Thomas, 2012; Desgagné, 1997; Desgagné, Bednarz, Lebuis, Poirier, & Couture, 2001; Strasser, Baudry, Mahr, Sanchez, & Tancoigne, 2019).

La relation entre chercheurs et non-chercheurs n'est pas clairement définie comme dans une recherche classique où le chercheur essaye d'être le plus éloigné possible des participants, neutre, voire invisible. Dans la recherche participative, les points de vues et les opinions de chacun sont importants dans le processus de découverte. L'objectivité et la neutralité sont alors remplacées par de la subjectivité réfléchie (Bergold & Thomas, 2012). L'avantage majeur de ce type de recherche est de travailler avec des personnes du terrain qui, de ce fait, ont une connaissance de celui-ci et de la manière d'interagir au mieux avec lui. Cela permet donc de construire une récolte des données adaptée aux participants et de développer de nouvelles méthodes d'investigation appropriées aux situations concrètes de la recherche et aux participants (Bergold & Thomas, 2012).

2. Les étapes de mise en place d'une recherche participative

Dans un article de 2009, Bonney et son équipe définissent neuf étapes nécessaires pour la création d'un projet de recherche participative (Bonney, Cooper, et al., 2009). En fonction du type de projet, les cinq premières étapes présentées ci-après peuvent être différemment ordonnées (Bonney, Cooper, et al., 2009).

Pour commencer, il est essentiel d'établir une question scientifique. Cela est conditionné par deux éléments : le nombre d'individus souhaité et le temps possible de formation pour les non- chercheurs. En effet, une question scientifique complexe et précise induira un nombre de participants moins important car il y aura potentiellement moins de personnes intéressées par cette question. Les projets simples sont donc à privilégier lorsqu'on souhaite toucher un large public. En outre, plus le projet et la récolte des données seront complexes, plus le besoin et le temps de formation seront importants. De ce fait, plus le temps possible de formation sera court, plus la récolte des données devra être simplifiée et reposer sur des compétences basiques (*e.g.* compter un nombre d'items).

La deuxième étape concerne la création d'une équipe scientifique interdisciplinaire avec un chercheur, un tuteur, un technicien et un évaluateur. Dans cette équipe, le rôle du chercheur sera d'assurer l'intégrité du projet scientifique, de développer un protocole expérimental permettant une bonne qualité des données et d'analyser et publier les données une fois collectées. Le tuteur a pour rôle d'expliquer le projet aux participants, tester les protocoles pilotes et assurer la création d'un support permettant les retours qualitatifs des participants. Le technicien a pour fonction de développer l'outil permettant la récolte des données et l'analyse de ces dernières. Enfin, l'évaluateur aura pour rôle de s'assurer que le projet est réalisable, mesurable et qu'il répond aux objectifs initiaux tout au long de l'expérimentation.

La troisième phase d'une recherche participative est la création d'un protocole expérimental, l'élaboration d'un recueil de données et la mise en place d'une formation pour les non- chercheurs. Dans une recherche participative, la qualité des données recueillies est un aspect primordial. Pour cela, trois éléments sont nécessaires : construire un protocole clair, préparer un document simple et logique de récolte des données et aider les participants à suivre le protocole. Il est donc essentiel de cadrer au maximum le projet afin de limiter l'introduction de biais expérimentaux. Cela commence donc par le protocole qui doit parfaitement définir

quand, où et comment les données doivent être collectées. L'objectif du protocole est que les données de l'ensemble des participants soient collectées et analysées ensemble. Ce protocole doit donc être facile à mettre en œuvre, explicable de manière claire et engageant pour les participants. Ensuite, il est indispensable que la récolte des données soit facile à appréhender et qu'elle soit en accord avec le protocole. Enfin, une formation méthodologique doit être mise en place pour permettre aux participants de comprendre et mener à bien le protocole. Cela peut se faire par le biais de guides, de vidéos, de newsletters, de FAQ (*i.e. frequently asked questions*) ou bien de forums d'échanges.

Le recrutement des participants est la quatrième étape. L'aisance de celle-ci est très dépendante des buts et de l'audience recherchée pour le projet. En effet, lorsque le projet est développé pour le grand public, le recrutement est facile et peut se faire par des journaux, un mail à une liste de diffusion ou encore par le biais d'une conférence. En revanche, lorsque le projet est construit pour une audience spécifique, il est nécessaire d'adapter la technique de recrutement à cette audience, et il est parfois indispensable de passer par un partenariat.

La cinquième étape d'une recherche participative, toujours selon Bonney et son équipe, est de former les participants aux connaissances théoriques nécessaires pour le projet, aux instructions de la recherche, au matériel utilisé ainsi qu'à la récolte des données. En effet, il peut être difficile pour des personnes n'ayant jamais pratiqué de recherche expérimentale de comprendre les différentes procédures méthodologiques d'une recherche. C'est pour cette raison qu'un programme de formation est nécessaire pour mieux comprendre les différentes procédures dans le cadre du projet (Bergold & Thomas, 2012).

La sixième est la récolte et la vérification des données. Il s'agit de vérifier la validité des données et de les rendre publiques à l'ensemble des participants. Cette étape peut se faire en papier-crayon ou de façon dématérialisée. Faire manipuler et étudier ces données par les non-chercheurs est une caractéristique pédagogique importante dans une recherche

participative. L'objectif est donc de regrouper l'ensemble des données et de les préparer pour ensuite les analyser.

L'analyse et l'interprétation des données constituent la septième étape d'une recherche participative. Ce type de recherche a tendance à produire un ensemble de données qui sont parfois complexes à analyser et interpréter. Cependant, leur avantage majeur réside dans le grand nombre de données recueillies qui permet une forte puissance statistique. Fréquemment, les données issues d'une recherche participative mettent en avant des phénomènes ou des modèles généraux qui doivent ensuite être examinés et détaillés avec des études plus ciblées.

La huitième étape est la diffusion des résultats dans différentes revues scientifiques, mais aussi auprès des décisionnaires politiques. C'est pour cela que la diffusion est également importante dans la littérature populaire. De plus, ce canal de diffusion permet de faire connaître au grand public les façons de contribuer à la science, en espérant motiver de nouvelles personnes à y participer.

Enfin, la dernière et neuvième étape d'une recherche participative est une étape *a postériori* d'évaluation des impacts de celle-ci. Il s'agit d'observer si les objectifs scientifiques et pédagogiques ont été atteints. Cela peut être évalué de différentes façons. La taille et la qualité des données recueillies, le nombre de publications scientifiques ou encore le nombre de citations dans d'autre articles sont des bons indicateurs pour mesurer la contribution scientifique d'une recherche participative. Pour ce qui est de l'impact sur la culture scientifique partagée, on peut mesurer la durée d'engagement des participants dans le projet, l'évolution de la compréhension du contenu scientifique par les participants ou encore leur compétence à mener une expérimentation. L'intérêt de ces différentes mesures est de pouvoir publier ensuite la méthodologie utilisée pour la diffuser et susciter de nouvelles recherches.

3. Les différentes formes de recherche participative

Dans un rapport de 2009 pour le Centre pour l'avancement de l'enseignement scientifique informel des Etats-Unis (CAISE), une équipe de sept chercheurs s'est réunie pour définir les différentes formes de recherches participatives existantes, ainsi que l'implication des non- chercheurs dans chacune d'elles (Bonney, Ballard, et al., 2009). Ces derniers ont relevé trois formes de projets et les ont classés des moins participatifs au plus participatifs : les projets contributifs, les projets collaboratifs et les projets cocréés (*cf.* Tableau 1).

Tableau 1. L'intégration des non-chercheurs aux différentes étapes d'une recherche participative diffère en fonction de la forme du projet.

	Projets contributifs	Les projets collaboratifs	Les projets cocréés
Etablir une question scientifique			X
Créer une équipe scientifique interdisciplinaire			X
Créer le protocole expérimental, le receuil des données et la formation		(X)	X
Recruter les participants			X
Former les participants			X
Récolter les données	X	X	X
Analyser et interpréter les données	(X)	X	X
Diffuser les résultats	(X)	(X)	X
Evaluer les impacts de la recherche		(X)	X

X = les non-scientifiques sont inclus dans cette étape
(X) = les non-scientifiques sont parfois inclus dans cette étape

Les projets contributifs sont généralement des projets conçus par les chercheurs dans lesquels le rôle des non- chercheurs est de récolter les données sur le terrain. Ce sont donc des

projets de collecte de données, menés par les chercheurs. La plupart du temps, les questions scientifiques sont donc des questions qui requièrent un grand nombre de données, que ce soit sur une longue période et/ou sur un vaste espace géographique. Les non- chercheurs collectent donc ces données en suivant le protocole expérimental pré-défini par les chercheurs. Il arrive parfois que les non- chercheurs soient également invités à analyser les données recueillies et les présenter. Dans les projets contributifs, les non-chercheurs ne déterminent aucune étape du projet.

Les projets collaboratifs sont quant à eux un peu plus participatifs. Tout comme les projets contributifs, ils sont globalement conçus par les chercheurs et les non- chercheurs récoltent les données. Cependant, ces derniers sont également activement engagés dans différentes étapes de la recherche comme l'analyse les données, l'interprétation des résultats, l'établissement de conclusions ou encore la diffusion des résultats auprès d'autres membres (chercheurs ou non) ou auprès de décideurs politiques. Les non-chercheurs peuvent également aider à définir ou redéfinir le protocole de récolte des données une fois l'expérimentation terminée.

Enfin, les projets cocréés sont les projets les plus participatifs. Dans ces derniers, les chercheurs et les non- chercheurs travaillent ensemble. Ces derniers sont activement engagés dans la plupart voire toutes les étapes du processus scientifique. La plupart du temps, les non-chercheurs viennent avec une question ou un problème et travaillent avec les chercheurs pour y répondre et suggérer des solutions. Les non- chercheurs sont encouragés à participer à toutes les étapes du processus de recherche, de la définition de la question jusqu'à la communication des résultats et l'établissement de nouvelles questions de recherche. Lorsqu'une partie du projet ne fonctionne pas, les chercheurs et les non- chercheurs travaillent ensemble pour modifier cela et améliorer le projet.

4. Exemples de recherches participatives dans différents domaines scientifiques

A ses débuts, la recherche participative était principalement utilisée en sciences naturelles. Cependant, avec l'avènement d'Internet et des technologies numériques, elle s'est largement développée pour désormais toucher de multiples disciplines allant de l'astronomie ou la zoologie à l'économie (Bonney, Phillips, Ballard, & Enck, 2015; Shirk & Bonney, 2020). Par exemple en sciences naturelles, et plus particulièrement en biologie et écologie des oiseaux, Bonney et son équipe ont développé différents protocoles scientifiques permettant à des non-chercheurs de contribuer à différentes récoltes de données. Il s'agissait de mieux connaître les diverses espèces d'oiseaux présentes dans le nord de l'Amérique, et leur localisation, ou encore faire le focus sur 16 espèces d'oiseaux, uniquement dans les espaces urbains (Bonney, Cooper, et al., 2009). Dans le domaine de l'astronomie, une équipe d'une trentaine de chercheurs a montré que l'implication de non-chercheurs dans l'observation d'exoplanètes réduirait considérablement les frais de recherche et permettrait d'obtenir des informations plus précises sur le transit d'exoplanètes. En effet, l'observation de ces transits demande aux laboratoires d'onéreux temps d'observation pour être efficace et précise, alors que le budget alloué à cette tâche est en baisse au fil du temps. Le recrutement de non-chercheurs permet donc de palier à cela et ce avec du matériel accessible (un télescope de 6 pouces étant suffisant), puisque l'observation des non- chercheurs permettait d'économiser 10 000 jours d'observation pour une étude de 1000 planètes (Zellem et al., 2020). L'implication des non- chercheurs dans la recherche permet donc de recueillir des données à grande échelle de façon rentable (Zoellick, Nelson, & Schauffler, 2012). Prenons un autre exemple, en économie, où l'équipe d'Esther Duflo, Abhijit Banerjee et Michael Kremer, saluée par le prix Nobel d'économie en 2019, a montré l'intérêt d'impliquer les non- chercheurs dans l'éducation des jeunes analphabètes en Inde (Banerjee, Banerji, Duflo, Glennerster, & Khemani, 2010). Dans cette expérimentation,

les auteurs ont montré qu'informer les populations sur l'état de l'éducation dans leur village, ou de leur demander de recueillir des informations à ce sujet n'avait pas d'impact sur l'implication de ces derniers (*i.e.* se porter volontaire pour apprendre à lire) ni sur les apprentissages des enfants. En revanche, lorsqu'on proposait aux citoyens, d'une façon plus participative, de se former à un outil pédagogique pour pouvoir ensuite aider les plus jeunes, ces derniers ont été très nombreux à se porter volontaires, ce qui a permis aux enfants analphabètes de commencer à lire (Banerjee et al., 2010). Enfin, en santé publique, une étude de 2019 a montré l'importance d'impliquer les citoyens dans la prévention du paludisme au Rwanda (Asingizwe et al., 2019). Dans cette recherche, les chercheurs et les non- chercheurs ont coconstruit un protocole permettant de recenser les différentes espèces de moustiques et de les surveiller dans le but de contrôler la maladie. Les non-chercheurs étaient alors impliqués dans la création d'outils techniques pour collecter et signaler les espèces et les cas confirmés de paludisme. Dans ce programme, les citoyens étaient donc impliqués dans une recherche qui, au-delà de leur apporter de nouvelles connaissances scientifiques (techniques et méthodologiques), leur apportait un bénéfice direct.

En ce qui concerne le domaine de l'éducation, la plupart des recherches participatives portent sur les pratiques des enseignants, mais peu sur les apprentissages des élèves eux-mêmes. Ainsi, on observe que les enseignants sont engagés dans la recherche pour questionner leur formation ou leurs pratiques pédagogiques, mais qu'ils sont rarement impliqués dans des recherches dont l'objectif est d'améliorer les apprentissages scolaires des élèves. Il n'existe donc pas d'études à notre connaissance où les enseignants sont pleinement impliqués dans les différentes étapes de la recherche scientifique, en sciences cognitives par exemple, et notamment la création du protocole expérimental, l'application de ce dernier et la récolte des données, en faveur des apprentissages de leurs élèves. Pour autant, les politiques internationales

actuelles suggèrent que les stratégies d'éducation et d'apprentissage doivent être guidées par les sciences et les preuves (Duraiappah et al., 2021).

II. Le cadre de cette thèse

1. Le financement de la thèse

Cette thèse est le fruit d'un partenariat entre les Editions Nathan et plus particulièrement Lea.fr, et le Laboratoire de Psychologie du Développement et l'Education de l'enfant (LaPsyDÉ – UMR CNRS 8240). Pour cela, nous sommes passés par le dispositif d'une bourse CIFRE (*i.e.* Convention Industrielle de Formation par la REcherche) qui subventionne une entreprise lorsque cette dernière embauche un doctorant pour le placer au cœur d'une collaboration de recherche avec un laboratoire public. Ce financement provient du Ministère de l'Enseignement Supérieur, de la Recherche et de l'Innovation (MESRI) et est mis en œuvre par l'Agence Nationale de la Recherche et de la Technologie (ANRT). Les objectifs de ce type de financement sont de renforcer les échanges entre les laboratoires de recherche et les entreprises, de favoriser l'emploi des docteurs et de contribuer au processus d'innovation des entreprises. Dans le cadre de la nouvelle Loi de Programmation de la Recherche (LPR), promulguée en décembre 2020, ces objectifs sont encore renforcés.

2. Lea.fr, le réseau numérique, pédagogique et collaboratif des Editions Nathan

2.1. L'histoire des Editions Nathan

La Maison Nathan est créée en 1881 par Fernand Nathan (*cf.* Figure 12). Cette même année est votée, par Jules Ferry, la loi établissant la gratuité de l'enseignement ainsi que la généralisation des Ecoles Normales primaires d'instituteurs et d'institutrices. L'année suivante, Jules Ferry rendit l'école obligatoire et laïque pour les enfants de 6 à 14 ans. Fernand Nathan est alors âgé de 23 ans lorsqu'il devient l'un des partenaires engagés dans cette école de la République en tant qu'éditeur, avec pour objectif de diffuser le plus largement possible le savoir et l'envie d'apprendre. Il conçoit ainsi les nouveaux livres des élèves, mais aussi les ouvrages pour les Ecoles Normales permettant la formation des jeunes maîtres, et se fait déjà remarquer pour la qualité de ses ouvrages, son adaptation à l'enfant (ergonomie, taille et résistance) et son innovation. A la fin de la Première Guerre Mondiale, Pierre Nathan, le fils de Fernand, rejoint son père et l'entreprise commence à prospérer. Ce dernier va alors apporter un nouveau souffle à la Maison, lancer les jeux éducatifs Nathan et développer les revues pédagogiques et les collections pour la jeunesse, pendant que son père confirme son succès dans le domaine des manuels scolaires. Pendant de nombreuses années, les Editions Nathan seront les seules à créer des jeux dont la philosophie est d'éduquer en s'amusant et en stimulant la mémoire, l'habilité et l'intelligence. La Maison va alors continuer de se déployer en profitant de l'évolution des technologies pour utiliser les supports de l'image et de la parole comme outils de transmission du savoir.



Figure 12. Portrait du fondateur de la Maison Nathan, Fernand Nathan

La Seconde Guerre Mondiale, l'occupation allemande et la pénurie de papier d'après-guerre mettent la maison Nathan en difficulté. Malgré tout, les héritiers Nathan s'adaptent à la période (allongement de la durée de la scolarité, transformation du système scolaire, baby-boom, généralisation du travail féminin) et continuent d'innover et de se diversifier en s'appuyant sur leurs valeurs d'origine : le progrès et l'innovation pédagogique au service du plus large accès à la connaissance. Dans cette dynamique, le parascolaire se développe et Nathan édite en 1950 les premiers cahiers de vacances permettant de faire étudier les enfants de façon ludique (depuis 1936, le Front populaire et les congés payées, de plus en plus de familles partaient en vacances). Le public s'élargit alors bien au-delà des écoles et les jeux éducatifs Nathan deviennent une référence incontestée, tant chez les enseignants que chez les parents.

A la fin des années 1980, Nathan s'adapte à la révolution informatique et se lance sur le marché du multimédia en proposant des logiciels tels que « Ecrire sans faute » ou « Anglais pour le bac » et des CD ROM à destination des enfants. Tout au long des années 1990, les documentaires et la littérature jeunesse ne cessent de se développer à travers des collections à succès (*e.g.* Kididoc, T'choupi). Au fil des années, l'empreinte du numérique intègre de plus en plus les productions éditoriales de Nathan avec des manuels numériques, des sites compagnons ou encore des portails disciplinaires.

Nathan, sous la direction aujourd'hui de Catherine Lucet, est donc une maison d'édition vieille de 140 ans dont les valeurs fondatrices demeurent malgré les changements sociaux mondiaux, les changements de dirigeants et la révolution du numérique : proposer les solutions éducatives les plus adaptées en termes de pédagogie et d'innovation. C'est dans cet esprit que s'inscrit le portail pédagogique et collaboratif Lea.fr. C'est dans cet état d'esprit aussi que depuis 2017, Catherine Lucet a décidé d'investir dans les sciences cognitives et les neurosciences, via un partenariat mécénat de Nathan avec la chaire Sorbonne Neuroéducation

et Créativité du LaPsyDÉ au sein de la Fondation de Université de Paris (chaire dirigée par Grégoire Borst et Olivier Houdé). C'est l'intérêt du LaPsyDÉ pour le portail Lea.fr, présenté par sa directrice Pascaline Citron, qui a cristallisé le point de départ de ce riche partenariat.

2.2. Les débuts de Lea.fr

Avec l'apparition, la généralisation et la gratuité du numérique, les revues pédagogiques papier ont rapidement été mises à mal et ont dû se réinventer pour survivre. C'est le cas de deux revues des Editions Nathan *Education Enfantine* et *Journal des Instituteurs* qui, à la fin des années 2000, sont devenues bimédia. Ces dernières se sont regroupées dans une même revue *L'Ecole Aujourd'hui* réservée aux enseignants des écoles maternelles et élémentaires, accompagnée d'un site internet permettant d'obtenir des contenus complémentaires (*e.g.* des fiches pédagogiques). Cette innovation n'a toutefois pas été suffisante pour la survie de la revue papier qui s'est arrêtée en 2013 pour uniquement laisser place à la version numérique Lea.fr (*i.e.* toujours L'école Aujourd'hui) dont le rôle s'est transformé et élargi. Son ambition était de fédérer les enseignants dans une communauté d'échange et de partage et de leur apporter une nouvelle manière de faire classe par le biais de fiches pédagogiques, d'activités originales et de groupes de travail.

Rapidement Lea.fr et le service Pédagogie de Nathan, dirigées par Pascaline Citron, s'associent pour proposer des contenus toujours plus innovants. Par le biais de la plateforme numérique et plus particulièrement de son Lab' pédagogique, des auteurs de pédagogie alimentent des groupes de travail permettant aux enseignants du primaire de tester directement dans leur classe des méthodes et des pédagogies innovantes. Une fois validées par la communauté, ces pratiques sont éditées en ouvrages. De nouvelles collections voient alors le jour comme « Méthode testée en classe ».

En 2017, Lea.fr et plus particulièrement ce Lab' pédagogique prend un nouveau tournant en permettant à des laboratoires de recherche (en l'occurrence le LaPsyDÉ du CNRS) et des Start-Ups de proposer des outils et démarches pédagogiques innovants et de les faire tester dans des groupes de travail collaboratifs. Enfin, l'année 2020 marque l'ouverture de Lea.fr aux enseignants du collège avec des contenus adaptés à ces derniers.

2.3. Lea.fr aujourd'hui

A l'heure actuelle, Lea.fr est une communauté pédagogique et collaborative regroupant près de 145 000 enseignants du primaire et du collège. Nous conseillons au lecteur de découvrir la plateforme en se rendant sur : www.lea.fr.

La plateforme est animée par une équipe de neuf personnes accompagnée d'une trentaine d'auteurs qui créent les contenus pédagogiques. Ces derniers sont répartis au sein de trois pôles. Il y a tout d'abord un pôle de formation et d'information qui permet aux enseignants d'accéder à des dossiers, des articles et des conférences. Le second pôle est un pôle d'aide à la préparation et l'animation de la classe qui propose de nombreuses fiches pédagogiques mais aussi des propositions éditoriales innovantes, tels que des défis pour la classe ou autres projets pédagogiques. Enfin, le troisième pôle, le Lab' d'innovation pédagogique, réunit tous les groupes de travail dans lesquels les enseignants peuvent tester les propositions pédagogiques des auteurs, tester les propositions innovantes des Start-Ups mais aussi faire de la recherche participative. Cette thèse CIFRE s'inscrit pleinement dans ce dernier pôle.

L'accès aux différents contenus pédagogiques de Lea.fr est conditionné par une inscription des utilisateurs. Ces contenus sont proposés à la communauté d'enseignants sous forme d'articles dans lesquels nous pouvons insérer des vidéos, des images ou encore des documents supplémentaires téléchargeables en pièces-jointes. L'interactivité de la communauté

se fait par le biais de commentaires que les enseignants peuvent écrire en lien avec un article. Ils peuvent alors communiquer entre eux via des échanges par commentaires et avec l'équipe de Lea.fr, mais aussi partager leurs expériences ou leurs questionnements. Enfin, afin d'assurer la communication autour de nos différents projets, une NewsLetter est envoyée de façon hebdomadaire aux enseignants.

3. La collaboration entre Lea.fr et le LaPsyDÉ : allers-retours du labo à la classe

3.1 Les enjeux de cette collaboration

Cette collaboration entre Lea.fr et le LaPsyDÉ, fruit d'une rencontre à la Sorbonne entre Pascaline Citron et Olivier Houdé, a tout d'abord été établie dans le but de rapprocher enseignants et chercheurs et les faire collaborer autour d'une recherche participative. Dans ce cadre, Lea.fr permet de créer et d'entretenir ce lien. Lea.fr est donc l'outil qui nous permet de faire cet aller-retour du laboratoire à la classe. Lorsque certains suggèrent que le fossé entre enseignants et chercheurs est trop grand (Bowers, 2016), d'autres pensent, au contraire, que la recherche participative permet de réduire la distance entre le monde de l'éducation et le monde de la recherche (Daniel, 2012; Houdé, 2021). Ce rapprochement permet aux enseignants de mieux comprendre les découvertes actuelles et d'apprendre comment les mettre en place dans leur classe. De plus, participer à une recherche participative permet aux enseignants de se former à la méthodologie scientifique, ainsi qu'aux théories sous-jacentes au projet (Bonney et al., 2015) et donc de découvrir comment ces découvertes en sciences cognitives peuvent être mises en place dans leur classe (Ansari, De Smedt, & Grabner, 2012). Cette formation des non-chercheurs permet également d'éviter la création de neuromythes dans la communauté éducative (Howard-Jones, 2014). Enfin, créer un lien entre enseignants et chercheurs permet à

ces derniers de mieux comprendre les pratiques pédagogiques utilisées en classe et donc de proposer des protocoles de recherche adaptés à celles-ci (Sigman, Peña, Goldin, & Ribeiro, 2014).

Par ailleurs, la collaboration entre Lea.fr et le LaPsyDÉ est l'opportunité de tester écologiquement (au sens de l'environnement de la classe et de l'école) et à grande échelle les découvertes en sciences cognitives du développement et de l'éducation. Comme nous avons pu le voir précédemment, la recherche participative permet de faire de la recherche expérimentale et écologique en impliquant les acteurs du terrain. Cependant, en éducation et sciences cognitives, ces recherches n'existent pas ou peu. Les différentes recherches de terrain présentées dans le second chapitre de cette thèse étaient soit menées sur de petits échantillons régionalisés, soit elles utilisaient des évaluations non-écologiques informatisées, soit encore elles impliquaient des expérimentateurs extérieurs à la vie de la classe (Diamond et al., 2007; Lakes & Hoyt, 2004; Zhao et al., 2015). Cette collaboration inédite Lea.fr – LaPsyDÉ permet donc de contrecarrer ces éléments, tout en impliquant pleinement les enseignants dans le processus de recherche. Lorsqu'on fait de la recherche participative en associant éducation et sciences cognitives, il est nécessaire de trouver un bon équilibre entre a) la puissance des méthodes de recherche pédagogique à grande échelle, contrôlées randomisées, valides sur le plan écologique et b) des méthodes expérimentales qui utilisent des échantillons de taille relativement petite et des environnements très contrôlés, qui sont par conséquent des approches écologiquement moins valides (Ansari et al., 2012).

Faire de la recherche participative guidée par le laboratoire (LaPsyDÉ) par le biais de Lea.fr permet donc de faire de la recherche tout à la fois expérimentale et écologique et de travailler en collaboration avec les enseignants, à grande échelle, autour de leurs problématiques du terrain scolaire.

3.2 Comment passer du laboratoire à la classe ?

Comme nous l'avons exposé précédemment, lorsque l'on souhaite faire de la recherche participative, neuf étapes de mise en place sont requises (Bonney, Cooper, et al., 2009). Cependant, certaines d'entre elles sont communes avec la recherche fondamentale (*e.g.* définir une question scientifique, diffuser les résultats, etc). Nous décrirons donc dans cette partie, uniquement les étapes qui ont demandé une attention particulière d'adaptation à un projet participatif en école, tel que le nôtre.

La première étape de cette thèse fut donc de constituer une équipe pluridisciplinaire. Cette dernière était composée pour le côté scientifique d'Olivier Houdé et Grégoire Borst, directeurs du LaPsyDÉ et moi-même, et pour le côté pédagogique de Pascaline Citron, directrice de Nathan Pédagogie et Lea.fr, et de Julien Garbarg-Chenon, conseiller pédagogique dans l'académie de Paris, et auteur chez Nathan. Ce dernier avait donc pour rôle de nous aider à adapter au mieux les protocoles de recherche aux conditions du terrain ainsi que le langage à adopter avec les enseignants. Cette équipe pluridisciplinaire avait donc pour objectif de créer le pont entre le laboratoire et les classes en se rapprochant au plus près des enseignants, dont la plupart ne communiquait avec nous qu'à distance via Lea.fr.

L'étape suivante était d'informer l'Éducation nationale, et plus particulièrement les inspecteurs de l'Éducation nationale, ainsi que les directeurs d'école (Alibali & Nathan, 2010). En effet, bien que les enseignants aient une liberté pédagogique leur permettant de choisir leurs méthodes pédagogiques, leurs démarches didactiques et leurs types de médiations, il leur est demandé d'informer leur hiérarchie, ainsi que les familles des différents projets menés. Pour cela, nous avons donc proposé aux enseignants une lettre à transmettre à la hiérarchie présentant le projet. Du côté des parents d'élèves, nous avons préparé un courrier afin de les informer du projet, mais également pour leur demander l'autorisation de recueillir les données de leur enfant. En effet, chacun des élèves ayant participé aux projets de cette thèse étant mineurs, il

était indispensable que leurs parents donnent leur accord pour que les données des enfants aux différentes évaluations soient transmises au laboratoire, de façon anonyme, à des fins de recherches et de publications scientifiques. Sur tous ces aspects le LaPsyDÉ était déjà très professionnel, habitué depuis de nombreuses années aux études comportementales et même d'imagerie cérébrales (IRMf), avec des enfants (et parents) volontaires. La nouveauté ici est l'expérimentation via Lea.fr.

La troisième étape fut de former les enseignants. Cette formation était double : méthodologique et théorique. Pour ce qui est de la méthodologie scientifique, nous avons abordé l'intérêt de diviser les élèves au sein de deux groupes (contrôle et expérimental), d'adopter une attitude neutre vis-à-vis de ces deux groupes tout au long de l'expérimentation, d'évaluer les compétences des élèves avant et après l'intervention pédagogique (pré- et post-tests) par le biais d'évaluations standardisées et de rester au plus proche du protocole expérimental. Concernant la partie théorique, il s'agissait pour les enseignants d'avoir accès à l'ensemble des connaissances théoriques (la psychologie du développement de l'enfant et les neurosciences cognitives) nécessaires pour comprendre et réaliser le projet de recherche dans lequel ils s'engageaient. Pour l'ensemble de cette formation les supports étaient divers : conférences interactives, articles ou ouvrages de vulgarisation scientifique en français, FAQ, articles sur Lea.fr et interaction avec les enseignants par commentaires sur Lea.fr.

La quatrième étape portait sur la construction du protocole de recherche afin d'adapter les méthodologies classiques de recherche expérimentale en laboratoire à des conditions plus écologiques de classe. Nous avons donc dû remplacer les évaluations et interventions pédagogiques classiquement réalisées sur du matériel informatique de façon individuelle (à l'école dans une salle isolée), par des évaluations et des interventions papier-crayon facilement réalisables en groupe classe.

L’étape suivante pour passer du laboratoire à la classe fut de créer un outil permettant aux enseignants de récolter les performances des élèves aux différentes évaluations pour pouvoir ensuite nous les transmettre de façon anonyme. Pour cela nous avons construit des tableaux Excel simples d’utilisation ainsi qu’un processus d’anonymisation à mettre en place par l’enseignant. De cette façon, les données envoyées au laboratoire, à des fins statistiques, étaient déjà anonymisées.

Enfin, la dernière étape concernait l’évaluation de la recherche participative. Cette étape s’est faite par le biais de questionnaires qualitatifs qu’on demandait aux enseignants de compléter à la fin de chaque expérimentation. Il s’agissait d’obtenir des informations sur la qualité des interventions pédagogiques proposées, ainsi que sur la faisabilité du protocole expérimental en classe.

III. Conclusion

La recherche participative est ainsi tout à la fois un outil de médiation scientifique et d’expérimentation permettant de créer un échange bidirectionnel entre le monde de la recherche et le reste de la société, en l’occurrence l’école. Si les scientifiques commencent, depuis plusieurs années, à combler le fossé entre la recherche et l’éducation (Eustache & Guillery-Girard, 2016; Sander, Gros, Gvozdic, & Scheibling-Sève, 2018), les recherches participatives dans le domaine de l’éducation, dans le but d’aider les élèves dans leurs apprentissages, sont, quant à elles encore manquantes. Ainsi, développer des projets où enseignants et chercheurs travaillent ensemble permet aux chercheurs d’acquérir de nouvelles connaissances en pédagogie et de se rapprocher du terrain, et aux enseignants de se former aux dernières découvertes, théories et méthodes scientifiques, ainsi qu’à leurs limites (Ansari et al., 2012; Houdé, 2021). Si la recherche fondamentale peut éclairer les pratiques en classe, la recherche

écologique de terrain peut en retour guider la recherche fondamentale (Alibali & Nathan, 2010; Gardes & Prado, 2016). La collaboration sur laquelle repose cette thèse, entre un éditeur scolaire, et plus particulièrement sa communauté interactive et collaborative d'enseignants, et un laboratoire de recherche en psychologie expérimentale permet un réel aller-retour précieux du laboratoire à la classe.

CONTRIBUTIONS EXPERIMENTALES

Au fil de l'introduction théorique, nous avons pu mettre en avant le rôle fondamental des FE dans le développement cognitif tout au long de la vie (Diamond, 2013), et plus particulièrement du CI (Borst, Aïte, et al., 2015; Houdé, 2000, 2019b). De façon plus spécifique, le CI a un rôle essentiel dans l'acquisition des compétences scolaires (Houdé & Borst, 2015). En effet, on observe que les enfants, les adolescents et les adultes commettent des erreurs systématiques lorsqu'ils raisonnent. Ces erreurs sont dues à des heuristiques, des stratégies automatiques et intuitives dont la fiabilité est incertaine, qu'il convient d'inhiber pour accéder aux algorithmes, des stratégies plus lentes et plus coûteuses mais ayant une fiabilité certaine (Houdé, 2019a). Ainsi le CI montre son intérêt dans de nombreux domaines et notamment ceux de la lecture (Ahr et al., 2016), des mathématiques (Rossi et al., 2019) ou encore du raisonnement (Moutier et al., 2006).

De récentes études témoignent donc de la nécessité d'entrainer le contrôle inhibiteur, et ce dès le plus jeune âge (Morgan et al., 2019). Bien qu'il existe un manque de consistance sur les effets de transfert de l'entrainement et de stabilité temporelle de ce dernier (Diamond & Ling, 2016; Karbach & Unger, 2014), de nombreux travaux ont mis en avant les différents éléments essentiels à prendre en compte pour réaliser un bon entrainement (Diamond & Ling, 2016; Green & Bavelier, 2008). L'entrainement, qu'il soit « spécifique à une tâche » ou « sur le processus général », peut alors être proposé sous deux formats : informatique avec des tâches de laboratoire ou écologique avec des tâches se rapprochant de tâches quotidiennes. Ce second format semble apporter des résultats de transfert et de généralisation des bénéfices de l'entrainement plus intéressants que le premier (Diamond et al., 2007; Lakes & Hoyt, 2004; Zhao et al., 2015).

A ce stade, notre synthèse de la littérature fait état de très peu d'études entrainant le CI d'enfant de façon écologique (*e.g.* Diamond et al., 2007). Aussi, il n'y a, à notre connaissance, aucune étude impliquant totalement les enseignants dans le processus de recherche, alors même

que ces derniers sont les acteurs principaux engagés dans l'éducation scolaire des enfants. Ainsi, nous ne relevons aucune étude où les enseignants sont co-chercheurs dans cette dernière et sont impliqués dans la création du protocole, la mise en place des interventions pédagogiques et les évaluations de ces dernières. Bien que les recherches fondamentales en conditions contrôlées de laboratoire soient essentielles, il nous parait également important de tester ces interventions dans des conditions plus écologiques où les enseignants participent, afin de tester la réplicabilité des premières recherches. C'est dans cet état d'esprit que nous nous sommes intéressés aux projets de recherche participative. Que ce soit en sciences naturelles ou en sciences humaines et sociales, ces derniers ont montré leurs intérêts pour les découvertes scientifiques, les chercheurs, mais aussi les non-chercheurs participant à ces projets (Bonney, Cooper, et al., 2009; Bonney et al., 2015).

C'est dans ce cadre que nous avons initié cette thèse en collaboration avec les Editions Nathan, et plus particulièrement le département de Pédagogie hébergeant la plateforme numérique et collaborative Lea.fr. L'objectif de la thèse est donc de faire collaborer enseignants et chercheurs dans le but de renforcer le CI des enfants, de façon écologique. Grâce à notre équipe interdisciplinaire, nous avons pu proposer aux enseignants de Lea.fr de participer à une grande et inédite recherche participative de terrain autour du CI et des apprentissages de leurs élèves. Les près de 250 enseignants ont donc endossé un rôle de co-chercheurs dans la création des protocoles expérimentaux, de leur application et de leur évaluation. Nous proposons donc dans cette thèse d'établir un réel aller-retour du laboratoire à la classe.

Ainsi, dans une première étude nous proposons d'étudier la faisabilité d'une recherche participative avec des enseignants dans le but d'entrainer de façon générale le CI d'enfants d'âge scolaire. A cette fin, nous recruterons des enseignants du CE1 au CM2 sur Lea.fr pour coconstruire une intervention de cinq semaines regroupant différentes activités scolaires permettant de renforcer le CI des enfants. Pour commencer, il s'agira de former les enseignants

aux concepts théoriques et à la méthodologie expérimentale (*i.e.* adopter une attitude neutre, diviser la classe en deux groupes, dont un contrôle, évaluer les enfants). Ensuite nous construirons neuf activités d'entrainement avec, pour chacune d'elle, deux versions : l'une impliquant le CI, l'autre ne l'impliquant pas. Ainsi, nous pourrons opposer notre entrainement au CI à un entrainement contrôle actif. Enfin, nous adapterons une tâche de Stroop couleur pour une passation papier-crayon afin d'évaluer de façon groupale en classe les capacités de CI des enfants avant et après l'entrainement. Dans ce Stroop couleur, les enfants doivent, dans un premier temps, identifier la couleur de l'encre de mots dont celle-ci correspond au sens du mot écrit (*e.g.* **vert**), puis dans un second temps, identifier la couleur de l'encre de mots dont celle-ci est incongruente avec le sens du mot écrit (*e.g.* **vert**). Dans la seconde condition, les enfants devront inhiber l'information non-pertinente (*i.e.* le sens du mot) pour pouvoir donner une bonne réponse.

Au-delà de la co-construction des différentes activités d'entrainement, le rôle des enseignants sera d'être expérimentateurs dans leur propre classe en suivant un protocole expérimental rigoureux. Ils seront alors chargés d'évaluer les enfants avant et après l'entrainement, de les répartir au sein de deux groupes d'entrainement, de mener l'entrainement en classe avec les deux groupes, et de récolter et nous transmettre les données de leurs élèves aux évaluations. Cette première étude visera tout d'abord à prouver qu'il est possible de mener un projet de recherche participative avec des enseignants du CE1 au CM2 en suivant un protocole expérimental strict, tout en respectant les contraintes d'une classe traditionnelle (*e.g.* utiliser des évaluations papier-crayon de groupe et un entrainement en groupe sans matériel informatique). De plus, cette première étude permettra également de montrer qu'un entrainement général de cinq semaines composé d'activités de classe, mené par des enseignants, améliore les capacités de CI d'enfants de 7 à 12 ans.

Dans notre introduction, nous avons évoqué qu'un entrainement au CI pouvait être « basé sur le processus général », comme dans la première étude, mais aussi « basé sur une stratégie spécifique ». C'est pourquoi, dans une deuxième étude, nous avons souhaité identifier les erreurs systématiques que commettent les enfants en classe, ainsi que la période de développement de ces erreurs, afin de pouvoir ensuite proposer un entrainement spécifique sur ces erreurs. La littérature antérieure a déjà permis d'identifier plusieurs heuristiques devant être inhibées pour réussir une tâche spécifique dans différents domaines. Cependant, très peu d'études ont décrit précisément le développement de ces heuristiques, et plus particulièrement la période sensible à laquelle les enfants sont le plus sujet à commettre ces erreurs. Il s'agit donc d'identifier l'âge auquel les enfants réussissent les items congruents et échouent aux items incongruents (*i.e.* où utiliser l'heuristique fait tomber dans un piège), symbolisant qu'ils ne sont pas encore en capacité d'inhiber leur stratégie trompeuse.

Dans un premier temps, nous avons lancé sur Lea.fr une enquête préliminaire permettant aux enseignants de nous faire remonter l'ensemble des heuristiques qu'ils observaient dans leur classe, telle une cartographie. Ils devaient décrire l'erreur dans son contexte, la fréquence de celle-ci, ainsi que l'âge des enfants la faisant. Après plusieurs semaines, nous avons comptabilisé presque une centaines (92) de propositions d'heuristiques, et sélectionné huit d'entre-elles, particulièrement originales et emblématiques, pour étudier leur période de développement. Les heuristiques étudiées dans cette étude sont donc des heuristiques que commettent les enfants du CE1 au CM2. Elles portent sur la comparaison de nombres décimaux, la comparaison de fractions, la multiplication par 10, la soustraction avec retenue, les accords après les et vous, les accords en nombre, le chiffre des unités et les problèmes arithmétiques à contenus verbaux. Dans cette deuxième étude nous construisons donc, pour chacune de ces tâches, un exercice permettant d'évaluer les performances des enfants de chaque niveau de

classe aux items congruents et incongruents. Cette étude nous permet donc d'identifier une période sensible pour chacune de ces heuristiques.

Une fois la période sensible identifiée pour chaque heuristique, nous pourrons proposer une intervention pédagogique adaptée, c'est-à-dire un entrainement spécifique au CI autour de celles-ci. C'est l'ambition de nos études 3 et 4. Dans l'introduction de cette thèse, nous avons relevé qu'un entrainement spécifique basé sur l'inhibition explicite d'une heuristique précise et le simple rappel de l'algorithme correspondant permettaient de surmonter une erreur systématique dans le domaine du raisonnement déductif (Cassotti & Moutier, 2010; Houdé & Moutier, 1996; Moutier, Angeard, & Houdé, 2002; Moutier & Houdé, 2003; Rossi, Cassotti, Moutier, Delcroix, & Houdé, 2015). Nous souhaitons donc l'appliquer dans cette thèse à des enfants autour d'heuristiques scolaires.

Dans la troisième étude, nous proposons un entrainement au CI ciblé autour de la résolution de problèmes arithmétiques à contenus verbaux. En effet, des études précédentes ont montré que la résolution de problèmes arithmétiques du type « Louise a 10 billes. Elle a 5 billes de plus que Jean. Combien de billes a Jean ? » était difficile pour les enfants, mais aussi les adultes (Verschaffel, 1994). En effet, dans ce type de problèmes, les enfants auraient tendance à faire des erreurs d'inversion et à réaliser une addition alors que l'opération arithmétique à faire est une soustraction (Lewis & Mayer, 1987; Stern, 1993; Verschaffel, De Corte, & Pauwels, 1992). La difficulté à résoudre ce problème serait en partie due à la difficulté des enfants, des adolescents, des adultes et des experts en mathématiques à inhiber l'heuristique surapprise « additionner si plus, soustraire si moins » (Lubin et al., 2016; Lubin, Vidal, Lanoë, Houdé, & Borst, 2013). Nous souhaitons donc, dans cette troisième étude proposer un apprentissage au CI à des enfants étant dans la période sensible de cette heuristique. Pour cela, nous allons mener deux expérimentations afin de tester l'effet d'une intervention exécutive visant à entraîner les enfants à inhiber l'heuristique trompeuse « additionner si plus, soustraire

si moins » pour pouvoir activer la stratégie algorithmique appropriée. La première expérimentation sera une recherche expérimentale classique menée par un chercheur en individuel, alors que la seconde sera une recherche participative menée par les enseignants de Lea.fr en groupe (*i.e.* ils devront évaluer les enfants, les répartir au sein des deux groupes d'entrainement et mener les interventions pédagogiques). Dans chaque expérimentation, les compétences des enfants en résolution de problèmes arithmétiques à contenus verbaux seront mesurées par une évaluation avant (*i.e.* pré-test), immédiatement après (*i.e.* post-test immédiat) et cinq jours après l'intervention (*i.e.* post-test différé). L'objectif de cette étude est donc de montrer qu'un entrainement exécutif est plus efficace qu'un entrainement contrôle, pour apprendre aux enfants à surmonter leurs erreurs systématiques dans la résolution de problèmes arithmétiques, et que les résultats obtenus en recherche expérimentale classique peuvent être répliqués lorsque l'enseignant mène l'expérimentation en conditions de classe.

La quatrième et dernière étude de cette thèse aura également pour objectif d'entrainer les enfants de façon spécifique, mais cette fois sur la tâche piagétienne classique de conservation du nombre avec des enfants d'âge préscolaire. Dans cette tâche, on présente à des enfants deux rangées contenant le même nombre de jetons. On leur demande de reconnaître l'égalité numérique entre ces deux rangées, puis on écarte les jetons de l'une des deux rangées de telle façon qu'elle soit plus longue que l'autre. Piaget avait ainsi remarqué qu'avant 7-8 ans, les enfants ont tendance à répondre qu'il y a plus de jetons dans la rangée la plus longue (Piaget, 1952). Il a ensuite été démontré expérimentalement que l'échec des enfants dans cette tâche est dû à la difficulté à inhiber l'heuristique surapprise « longueur = nombre » (Houdé & Guichart, 2001). De ce fait, dans cette quatrième étude nous souhaitons réutiliser la méthodologie d'entrainement utilisée dans l'étude précédente et l'adapter à la tâche piagétienne de conservation du nombre. Pour cela, nous allons mener deux expérimentations visant à entraîner de façon spécifique les enfants préscolaires à inhiber leur stratégie heuristique trompeuse

« longueur = nombre », pour utiliser leur stratégie algorithmique adaptée de comptage. Cet entrainement exécutif sera opposé à un entrainement contrôle uniquement basé sur la stratégie logico-mathématique. La première expérimentation sera menée par un chercheur, de façon individuelle, alors que la seconde expérimentation sera une recherche participative, via Lea.fr, où les enseignants seront en charge d'évaluer les compétences des enfants dans la tâche de conservation du nombre, de les répartir au sein des deux groupes d'entrainement et de mener les interventions pédagogiques en groupe de 5 à 6 enfants.

L'ensemble de ce travail de thèse contribuera donc à tester si un entrainement général de cinq semaines mené par des enseignants, en situation écologique de classe, peut améliorer le CI d'enfants d'âge scolaire. Ensuite, nous examinerons les différentes erreurs heuristiques que les enseignants observent dans leur classe, ainsi que leur période de développement. Enfin, nous explorerons si un entrainement ciblé autour d'une heuristique précise peut aider les élèves à surmonter leurs erreurs systématiques, que ces entrainements soient dispensés par un chercheur en individuel ou par un enseignant en groupe. Le premier entrainement sera centré sur l'heuristique « additionner si plus, soustraire si moins » et le second s'axera autour de l'heuristique « longueur = nombre ».

Principaux axes de recherche	
Etude 1	Du laboratoire à la classe : entraîner le contrôle inhibiteur d'enfants d'âge scolaire par le biais d'une recherche participative avec des enseignants
Etude 2	Repérer et évaluer les heuristiques en classe des enfants d'âge scolaire par le biais d'une recherche participative menée par des enseignants.
Etude 3	Apprendre à inhiber une heuristique trompeuse pour surmonter les difficultés dans la résolution de problèmes arithmétiques à contenus verbaux : convergence de résultats obtenus au laboratoire et en recherche participative.
Etude 4	Apprendre à inhiber une heuristique trompeuse pour surmonter les difficultés dans la tâche de conservation du nombre : convergence de résultats obtenus au laboratoire et en recherche participative.

Étude 1

Du laboratoire à la classe : entrainer le contrôle inhibiteur d'enfants d'âge scolaire par le biais d'une recherche participative avec des enseignants.

Létang, M., Citron, P., Garbarg-Chenon, J., Houdé, O., & Borst, G. (2021). Bridging the gap between the lab and the classroom: An online citizen scientific research project with teachers aiming at improving inhibitory control of school-aged children. *Mind, Brain, and Education*, *15*(1), 122-128. (*cf.* Annexe 1)

Résumé

La science participative en ligne permet de réduire la distance entre les chercheurs et les non-chercheurs et d'améliorer la culture scientifique des non-chercheurs. Les objectifs de cette étude étaient de déterminer si un entrainement de 5 semaines mené par des enseignants dans leur classe améliorait le contrôle inhibiteur (*i.e.* CI) d'enfants de 7 à 12 ans, et de montrer qu'un projet de recherche participative en ligne pouvait fournir des résultats significatifs dans le domaine de l'éducation. Comme nous le supposions, les enfants ayant suivi un entrainement au CI ont amélioré leur capacité de CI, ce qui n'était pas le cas des enfants ayant suivi un entrainement contrôle. Cette étude est, à notre connaissance, la première à montrer qu'une recherche participative permet à la fois d'améliorer les capacités de CI d'enfants d'âge scolaire, mais aussi de combler le fossé entre le monde de la recherche et de l'éducation.

Mots-clés : Recherche participative, Contrôle inhibiteur, Activités scolaires, Entrainement.

Introduction

Depuis une quinzaine d'années, l'utilisation des découvertes neuroscientifiques pour faire évoluer les pratiques éducatives est débattue. Certains pensent que le fossé entre chercheurs et enseignants est trop grand pour être comblé (Bowers, 2016) alors que d'autres voient plus d'espoirs dans les domaines émergents des neurosciences et de l'éducation (*e.g.* Ansari, De Smedt, & Grabner, 2012). Jusqu'ici, la plupart du débat se centrait sur la question de savoir si de nouvelles connaissances sur le fonctionnement du cerveau peuvent améliorer l'enseignement et les pratiques éducatives, mais moins sur la façon de combler efficacement le fossé entre le laboratoire et la salle de classe.

Une façon intéressante de rapprocher ces deux communautés est de faire participer des non-chercheurs à des projets de recherche scientifique. Comme nous avons pu le voir dans l'introduction, il existe différents types de recherches participatives avec différents niveaux de participation des non-chercheurs : a minima, les non-chercheurs sont impliqués dans la collecte de données, mais dans certains projets, ces derniers sont impliqués dans la définition du problème et créent le matériel et la méthode à utiliser dans l'étude avec les chercheurs (*i.e.* les projets cocréés). Contrairement au rapprochement neurosciences – éducation, la science participative n'est pas un nouveau phénomène. Elle s'est principalement développée dans les domaines scientifiques où la collecte de grandes quantités de données est nécessaire, comme en écologie, botanique ou astronomie (Miller-Rushing et al., 2012). Du fait de l'avènement d'internet, et notamment des plateformes de recherche permettant d'augmenter la visibilité des projets, leur fonctionnalité et leur accessibilité, le nombre de projets en recherche participative grandit de façon exponentielle (Bonney et al., 2014). Si la science participative permet de diminuer la distance entre chercheurs et non-chercheurs, elle est également un moyen d'accroître la culture scientifique des non-chercheurs, et ce, plus particulièrement dans les

projets cocréés où les non-chercheurs sont totalement investis dans le processus de recherche (Bonney et al., 2015).

Cependant, comme nous avons pu le montrer dans l'introduction théorique, il n'existe pas, à notre connaissance, de projet de science participative cocréé avec des enseignants qui utilise une méthodologie expérimentale dans le but d'évaluer l'effet d'une intervention pédagogique en classe basée sur les compétences des élèves. Les études précédentes menées sur des élèves préscolaires ont impliqué des enseignants dans la réalisation d'interventions autour des fonctions exécutives (Diamond et al., 2007; Duncan, Schmitt, Burke, & McClelland, 2018; Traverso, Viterbori, & Usai, 2019), mais dans ces dernières, les enseignants n'étaient pas impliqués avec les chercheurs dans la conception du matériel utilisé pour l'entrainement, ni dans les évaluations avant et après intervention. Par le biais de cette première étude, nous avons donc souhaité déterminer l'effet d'une intervention pédagogique menée par des enseignants, dans leur classe, et ainsi démontrer qu'un projet de recherche participative en ligne peut fournir des résultats significatifs dans le contexte de l'éducation. Pour cela, nous avons choisi de construire et tester un entrainement général du CI, fonction exécutive au cœur de cette thèse et à la base du développement des compétences complexes et de façon générale du développement cognitif (Borst, Aïte, et al., 2015).

Le CI implique différentes composantes, en particulier l'inhibition de la réponse (*i.e.* la capacité à résister à une routine motrice et à ne pas agir de manière impulsive) et le contrôle des interférences (*i.e.* la capacité à sélectionner des informations pertinentes pour une tâche en supprimant le traitement des informations non-pertinentes) (Diamond, 2013). La tâche de Go/No-Go est classiquement utilisée pour mesurer l'inhibition de la réponse, alors que la tâche de Stroop couleur permet quant à elle de mesurer les capacités de contrôle des interférences (Diamond, 2013). Dans cette première étude, nous avons choisi d'utiliser la tâche la plus emblématique de la psychologie expérimentale, la tâche de Stroop couleur, afin d'évaluer l'effet

de l'entrainement au CI. Ce choix de tâche était motivé par deux motifs. Le premier est que de nombreuses études ont montré que surmonter une erreur systématique dans différentes tâches scolaires était lié à la capacité d'inhibition d'une information non-pertinente (*e.g.* Ahr, Houdé, & Borst, 2016; Rossi, Vidal, Letang, Houdé, & Borst, 2019). Le second est que la tâche de Stroop couleur était facilement adaptable aux contraintes de notre expérimentation : une passation de groupe réalisée par l'enseignant dans sa classe (*i.e.* une tâche papier-crayon pouvant être réalisée en groupe classe, nécessitant peu de matériel et n'étant pas chronophage). Néanmoins, il est important de noter que ce choix de tâche nous a contraint à restreindre l'étude à des enfants lecteurs.

Dans cette étude, les enseignants volontaires ont été recrutés sur la plateforme numérique et collaborative Lea.fr. Ils ont coconstruit l'étude avec les chercheurs et ont collecté les données aux sessions de pré-test et de post-test. Ces derniers étaient également en charge de la répartition de leurs élèves au sein de deux groupes : le groupe faisant l'entrainement expérimental et le groupe faisant un entrainement contrôle. Cette répartition au sein de chaque classe avait pour but de contrôler un possible effet maître (Nye, Konstantopoulos, & Hedges, 2004). Les enseignants étaient également amenés à réfléchir avec les chercheurs à la construction et la conduite des activités qui faisaient parties de l'entrainement. Ces activités d'entrainement étaient créées selon deux versions : l'une entrainant le CI, l'autre ne l'entrainant pas. Les capacités d'inhibition des enfants du CE1 au CM2 étaient évaluées collectivement par une tâche de Stroop couleur papier-crayon en pré-test et en post-test. Dans cette tâche, les enfants devaient déterminer la couleur d'encre d'impression d'un mot. Cette tâche était composée de deux types d'items : les items congruents où la couleur de l'encre était congruente avec la couleur dénommée par le mot (*e.g.* **bleu**) et les items incongruents où la couleur de l'encre était incongruente avec la couleur dénommée par le mot (*e.g.* **vert**). Pour réussir ces derniers items, les élèves devaient inhiber l'information non-pertinente, ici le sens du mot écrit. Les études

précédentes ayant montré que les fonctions exécutives, et plus particulièrement le CI, pouvaient être entrainées par le biais d'activités scolaires ou de cours de récréation (Diamond et al., 2007; Zhao et al., 2015), nous nous attendons à ce que les enfants suivant l'entrainement au contrôle inhibiteur aient une amélioration plus forte de leurs performances aux items incongruents de Stroop entre le pré-test et le post-test que les élèves ayant suivi un entrainement contrôle.

Méthode

Participants

Pour cette étude, nous avons recruté 1185 enfants de 7 à 12 ans. Un total de 136 enfants a été exclu de l'étude car ils avaient complété uniquement l'une des deux évaluations (*i.e.* le pré-test ou le post-test). Nous avons donc analysé les données de 1049 enfants : 161 CE1 (80 filles, 7,6 ± 0,3 ans), 143 CE2 (60 filles, 8,7 ± 0,4 ans), 321 CM1 (149 filles, 9,7 ± 0,4 ans) et 425 CM2 (212 filles, 10,6 ± 0,4 ans). Les enfants de chaque classe étaient répartis aléatoirement par leur enseignant au sein de deux groupes : le groupe entrainant le CI (N = 525, M = 9,6 ± 1,13 ans, 251 filles) et le groupe contrôle (N = 524, M = 9,6 ± 1,12 ans, 253 filles). Dans chaque classe, une moyenne de 12 enfants était dans le groupe expérimental et dans le groupe contrôle. L'étude a été menée en accord avec les normes nationales et internationales qui régissent la participation d'humains à la recherche. La participation des enfants se faisait sur le volontariat, après l'obtention d'un consentement éclairé des responsables légaux des enfants.

Matériel et procédure

Les enseignants (N=78) ont été recrutés sur la plateforme numérique et collaborative Lea.fr. Tous les enseignants étaient volontaires et enseignaient dans des écoles primaires francophones desservant une population diversifiée d'élèves. Nous avons utilisé la plateforme pour recruter les enseignants, définir les objectifs et les hypothèses du projet, former les enseignants à la méthodologie expérimentale, créer et télécharger le matériel utilisé pour les activités en classe et les évaluations et obtenir les données collectées par les enseignants au pré-test et post-test. Les chercheurs étaient impliqués dans toutes les étapes du projet. Pour commencer, ces derniers ont sélectionné des ressources (*e.g.* des articles, des conférences, des chapitres de livres) pour familiariser les enseignants au concept de CI et de son rôle dans les apprentissages scolaires. Ensuite, les chercheurs ont fourni un ensemble d'informations pour expliquer la méthodologie expérimentale aux enseignants (*i.e.* la réparation aléatoire dans les groupes, le groupe contrôle, la standardisation des interventions et des évaluations, les sessions de pré-test et post-test, etc). Toutes ces ressources étaient publiées sur Lea.fr ce qui permettait aux enseignants d'interagir avec les chercheurs tout au long de l'expérimentation, que ce soit sur les aspects scientifiques ou logistiques, et de faire un retour sur le matériel créé par les chercheurs pour les évaluations et les interventions.

Sessions de pré-test et le post-test

Dans les sessions de pré-test et post-test, les capacités de CI des enfants étaient mesurées par leur enseignant, dans leur classe, avec une tâche de Stroop couleur papier-crayon (Stroop, 1935) (*cf.* Annexe 2). Pour chaque mot présenté, les élèves devaient identifier la couleur de l'encre d'un mot, le plus rapidement possible, sans se tromper, en écrivant l'initiale de la couleur de l'encre (*i.e.* « R » pour rouge, « B » pour bleu, « V » pour vert et « J » pour jaune)

sur une feuille de réponse. Dans la condition congruente, pour chaque item, la couleur de l'encre était congruente avec la couleur dénommée par le mot (*e.g.* **bleu**). A l'inverse, dans la condition incongruente, pour chaque item, la couleur de l'encre était incongruente avec la couleur dénommée par le mot (*e.g.* **vert**). Dans cette condition, les élèves devaient inhiber l'information non-pertinente, ici le sens du mot écrit. Il y avait 80 items dans chaque condition. Les enfants avaient alors 40 secondes pour compléter le plus d'items possible dans chacun des conditions. Cette limite était déterminée selon les résultats d'un pré-test montrant aucun effet plancher ou plafond pour les élèves du CE1 au CM2. Chaque condition était précédée par 8 items d'entrainement. Tous les enfants complétaient les items congruents dans un premier temps, puis les items incongruents dans un second temps. Les enseignants déterminaient ensuite le nombre de bonnes réponses pour chaque élève pour les deux conditions, et envoyaient ces données aux chercheurs.

Sessions d'entrainement

Les sessions d'entrainement de dix minutes étaient réalisées quatre fois par semaine pendant cinq semaines. Neuf activités de classe étaient créées, avec les enseignants, pour être effectuées collectivement en classe, par chacun des deux groupes d'entrainement. Chaque activité durait entre 5 et 10 minutes. Ces dernières étaient réparties au sein de six sessions d'entrainement de 10 minutes qui étaient composées d'une seule activité (lorsque cette dernière durait 10 minutes) ou de deux activités (lorsque celles-ci duraient 5 minutes chacune). Chaque session était répétée trois fois pendant les 5 semaines d'entrainement, sauf deux d'entre-elles qui étaient répétées quatre fois. Deux versions de chaque activité étaient créées : l'une requérant le CI (*i.e.* exécutée par le groupe d'entrainement au contrôle inhibiteur) et l'autre ne faisant pas appel au CI (*i.e.* exécutée par le groupe d'entrainement contrôle). L'enseignant entraînait

chaque groupe dans sa classe : lorsqu'un groupe était entraîné, l'autre faisait une activité scolaire en autonomie. Dans le groupe d'entrainement au CI, les activités étaient créées pour entrainer les différentes composantes du CI des participants allant de l'inhibition de la réponse au contrôle des interférences (*cf.* Annexe 3).

Les activités étaient proposées comme des activités faisant parties de la vie de classe. Aucun des élèves était averti de son groupe d'entrainement, ni des différents objectifs de ces groupes. Tous les élèves, indépendamment de leur groupe, étaient avertis qu'ils participaient à une recherche scientifique dont le but était d'entraîner leur cerveau. Enfin, pour chacun des entrainements menés par l'enseignant, les élèves participaient aux mêmes activités, indépendamment de leur âge, leur niveau de classe, leur école ou de leur enseignant.

Résultats

Pour déterminer l'effet de l'entrainement au CI sur les capacités de CI des enfants, nous avons réalisé une 2 (Condition : congruente *vs.* incongruente) x 2 (Temps : pré-test *vs.* post-test) x 2 (Groupe d'entrainement : CI *vs.* contrôle) analyse de la variance (ANOVA) sur le nombre de bonnes réponses à la tâche de Stroop couleur.

L'ANOVA a démontré une interaction triple significative entre la Condition, le Temps et le Groupe d'entrainement, $F(1, 1047) = 10{,}49$, $p = .001$, $\eta^2_p = .01$ (*cf.* Tableau 2). De plus, on constate que les enfants du groupe d'entrainement au CI ont un score d'interférence (*i.e.* la différence entre le nombre de bonnes réponses aux items congruents et incongruents) plus faible, donc de meilleures capacités de CI, au post-test, que les enfants du groupe d'entrainement contrôle, $F(1, 1047) = 11{,}4$, $p < .001$, $\eta^2_p = .01$, alors que nous n'observons pas de différence significative entre les deux groupes au pré-test, $F < 1$ (*cf.* Figure 13). En outre,

alors que le score d'interférence des enfants du groupe d'entrainement au CI diminue entre le pré-test et le post-test, $F(1, 524) = 18{,}04$, $p < .001$, $\eta^2_p = .03$, le score d'interférence des enfants du groupe d'entrainement contrôle ne change pas entre les sessions, $F < 1$.

Tableau 2. Le score d'interférence à la tâche de Stroop couleur au pré-test et au post-test en fonction du groupe d'entrainement. Les écarts-types sont indiqués entre parenthèses.

	Entraînement contrôle	Entraînement au CI
Pré-test	5,42 (5,9)	5,72 (6,1)
Post-test	5,46 (5,5)	4,37 (5)

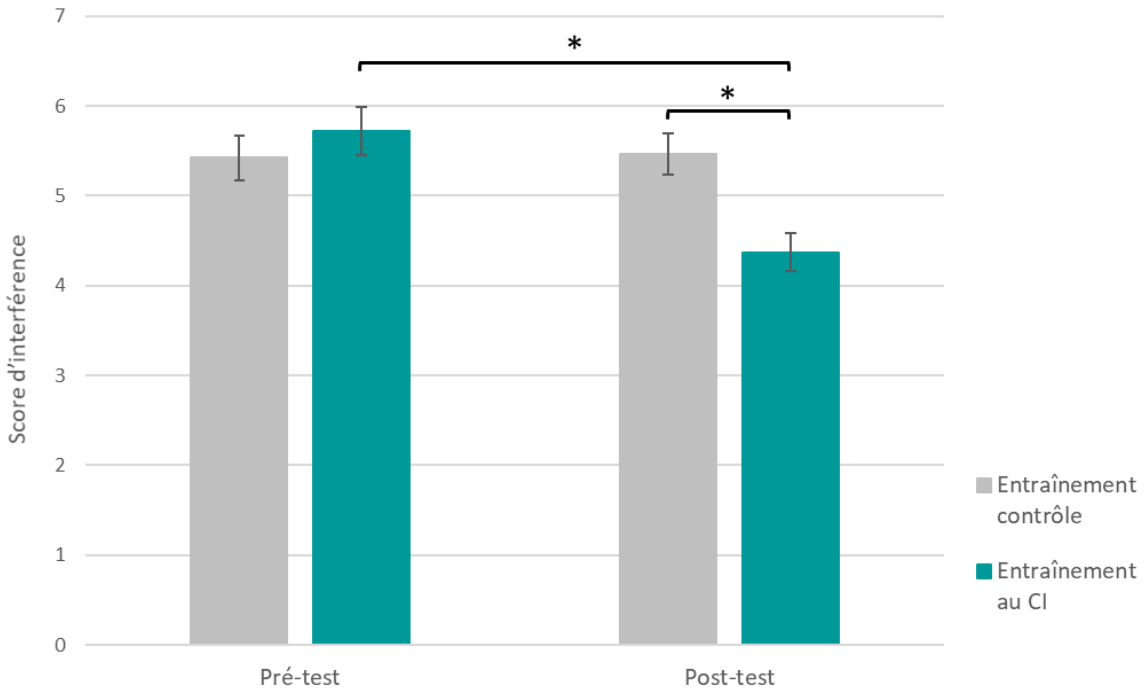


*Figure 13. Le score d'interférence à la tâche de Stroop couleur au pré-test et au post-test, en fonction du groupe d'entrainement. Les barres d'erreurs correspondent à l'erreur-type de la moyenne. * p < .05.*

Discussion

L'objectif de cette première étude était double. Il s'agissait de mesurer l'effet d'un entrainement en classe de 5 semaines sur les capacités de CI des enfants de 7 à 12 ans, et de

prouver qu'un projet de science participative adoptant une méthodologie expérimentale pouvait fournir des résultats significatifs. Conformément à nos attentes, nous avons montré que les enfants suivant les activités de classe impliquant le CI pendant 5 semaines amélioraient leur capacité de CI, ce qui n'était pas le cas des enfants qui suivaient des activités de classe n'impliquant pas le CI. Dans cette expérimentation, les enseignants étaient en charge de collecter les données aux évaluations, d'assigner aléatoirement des élèves au sein des deux groupes d'entrainement et de mener l'entrainement en classe. De ce fait, les résultats obtenus dans cette première étude répliquent ceux des études précédentes (*e.g.* Diamond et al., 2007), mais dans cette étude les enseignants n'étaient pas impliqués dans toutes les parties du projet. Notre étude démontre pour la première fois que les enseignants peuvent devenir expérimentateurs dans leur propre classe, en adoptant une méthodologie expérimentale, classiquement utilisée par les chercheurs en laboratoire.

Endosser le rôle d'expérimentateur dans une classe est compliqué pour les enseignants car cela leur demande une attitude neutre pendant les évaluations et la répartition des élèves au sein des deux groupes d'entrainement, ce qui va à l'encontre de leur envie naturelle d'aider les élèves ayant des difficultés scolaires (Yuen, Westwood, & Wong, 2005). Les enseignants sont typiquement tentés d'aider ces enfants en les intégrant au groupe expérimental pour qu'ils puissent bénéficier de l'intervention. Cependant, nos résultats ont montré qu'il n'y avait pas de différence de performance entre les élèves du groupe expérimental et du groupe contrôle au pré-test, ce qui suggère que les enseignants n'ont pas été biaisé dans leur répartition des élèves au sein des deux groupes. A l'issue de cette première étude, des études complémentaires restent cependant nécessaires pour déterminer si notre approche pour former les enseignants à la méthodologie expérimentale est suffisante ou non (*i.e.* les enseignants peuvent-ils réaliser une expérimentation sans supervision et peuvent-ils former d'autres enseignants ?).

Les résultats des précédentes études sont inconsistants quant aux éventuels effets de transferts proche ou lointain qu'un entrainement au CI puisse fournir. Par exemple, chez les maternelles, un entrainement au CI informatisé permet d'améliorer les capacités de raisonnement abstrait (Liu et al., 2015). Chez les enfants d'âge scolaire, un entrainement au CI utilisant un jeu de type « Jacques a dit » permet d'améliorer les performances des élèves à une tâche de Go/No-Go (*i.e.* inhibition de la réponse), mais n'a pas d'effet sur une tâche impliquant le contrôle des interférences (Zhao et al., 2015). De plus, un entrainement informatisé du CI sous forme de jeu améliore les performances d'enfants dans des tâches non-entraînées impliquant l'inhibition de la réponse (tâche de Go/No-Go) et le contrôle des interférences (*i.e.* la tâche de Flanker et similaire au Stroop) et en vitesse de lecture (transfert lointain) (Johann & Karbach, 2019). De plus, un entrainement informatisé au CI permet d'améliorer les compétences de MdT (Zhao & Jia, 2018) et d'intelligence fluide (Aydmune et al., 2019). Cependant, de nombreuses études ont montré l'absence de transfert proche et lointain après un entrainement au CI (Talanow & Ettinger, 2018) ou des effets de transfert proche dépendant de l'âge (*i.e.* chez les enfants mais pas chez les adultes, Zhao, Chen, & Maes, 2016). Dans ce contexte, nos résultats suggèrent qu'un entrainement basé sur des activités de classe améliorent le contrôle des interférences d'enfants d'âge scolaire, mesuré par une tâche de Stroop couleur (*i.e.* transfert proche).

Cette première étude présente trois limitations majeures. La première est que nous avons utilisé une seule tâche de CI pour mesurer les capacités de CI des élèves. La tâche de Stroop couleur n'évaluant que les capacités de contrôle des interférences (*i.e.* la capacité à sélectionner des informations pertinentes pour une tâche en supprimant le traitement des informations non-pertinentes), nous ne pouvons pas démontrer que les activités de classes proposées dans l'entrainement au CI amélioraient les autres types de CI comme par exemple l'inhibition de la réponse (*i.e.* la capacité à résister aux tentations et à ne pas agir de manière impulsive) mesurée

par exemple par une tâche de Go/No-Go (*e.g.*, Diamond, 2013). De plus, utiliser une adaptation papier-crayon de la tâche de Stroop couleur et l'administrer en groupe a pu affecter la composante de CI mesurée dans la tâche. Des études supplémentaires seraient donc nécessaires pour déterminer (a) dans quelle mesure les différentes composantes de CI pourraient être améliorées par les activités de classes de cette étude, et (b) si nous pouvons répliquer cette amélioration en utilisant la tâche classique de Stroop couleur (*i.e.* réalisée en individuel avec une réponse orale).

La seconde limitation de cette première étude est que certains biais classiques observés dans les expériences ont pu affecter nos résultats. Par exemple, le fait que les enseignants administrent les interventions, les évaluations et les cotent pourrait avoir induit un effet des attentes de l'expérimentateur. Par le biais de notre formation initiale, nous avons tenté d'alléger certains de ces biais en informant les enseignants de comment ces derniers se formaient, comment ils pouvaient affecter les résultats de la recherche et comment ils pouvaient être contrôlés. Néanmoins, des études complémentaires seraient nécessaires pour déterminer plus systématiquement à quel point ces biais peuvent être contrôlés ainsi que la taille de leurs effets dans un projet de recherche participative.

Enfin, la troisième limitation de cette étude est que nous n'avons pas mesuré les effets de transfert des activités d'entrainement sur les apprentissages scolaires et/ou le climat de classe. Nous avons donc peu de preuve pour avancer que nos activités peuvent influencer les apprentissages et/ou l'éducation. Cependant, un nombre croissant d'études montre que surmonter une erreur systématique dans différents apprentissages académiques est en partie lié à la capacité à inhiber une information non-pertinente (*i.e.* un processus de CI similaire à celui mesuré dans la tâche de Stroop couleur), comme dans les tâches piagétiennes (Borst, Poirel, Pineau, Cassotti, & Houdé, 2012b; Houdé & Guichart, 2001) ou encore la comparaison de nombres rationnels (Roell, Viarouge, Houdé, et al., 2019; Rossi et al., 2019). Ainsi, nous

spéculons qu'un transfert lointain pourrait être observé, en particulier dans les apprentissages scolaires en partie dans la capacité à inhiber une information non-pertinente. Cependant, il serait nécessaire de mener de nouvelles études pour prouver que des activités de classe comme celles que nous proposons dans cette première étude pourraient se transférer à des apprentissages scolaires et/ou au climat de classe.

L'ensemble de ces découvertes prouve pour la première fois qu'une recherche participative en ligne peut être menée en classe, et se centrer sur des problèmes intéressant les chercheurs et les enseignants, tout en utilisant une méthodologie expérimentale dans un contexte écologique sans intervention directe du chercheur. Il serait donc opportun de reproduire cette méthodologie dans différentes expérimentations, autour du CI. C'est l'ambition des trois prochaines études.

Étude 2

Repérer et évaluer les heuristiques en classe des enfants d'âge scolaire par le biais d'une recherche participative menée par des enseignants.

Citron, P., & Létang, M. (2018). Du labo à l'école : Une recherche collaborative en neurosciences. L'exemple LaPsyDÉ – Lea.fr. Dans O. Houdé & G. Borst (dirs.), *Le cerveau et les apprentissages* (pp. 261-276). Nathan.

Résumé

Les apprentissages scolaires des élèves sont jalonnés d'erreurs systématiques en relation avec une difficulté à inhiber ce qu'ils ont précédemment appris (Houdé & Borst, 2014). Ces erreurs sont dues à des stratégies automatiques appelées heuristiques. Par le biais d'une recherche participative impliquant des enseignants, l'objectif de cette étude est de repérer ces heuristiques que font les élèves du CE1 au CM2, et de les évaluer pour connaître l'âge auquel les élèves y sont les plus sujets. Il s'agit d'établir, pour chaque heuristique, une période sensible permettant ensuite de proposer une intervention pédagogique adaptées aux élèves. Pour cela, nous avons mesuré les performances des élèves à des items congruents (*i.e.* où l'heuristique permet d'obtenir la bonne réponse) et des items incongruents (*i.e.* où l'heuristique fait tomber dans un piège) pour chaque heuristique. Cette étude a donc permis de définir une période sensible pour la comparaison de nombres décimaux, la comparaison de fractions, la multiplication par 10, la soustraction avec retenue, les accords après les et vous, les accords en nombre, le chiffre des unités et les problèmes arithmétiques à contenus verbaux.

Mots-clés : Recherche participative, Heuristique, Période sensible, Contrôle inhibiteur.

Introduction

De nombreuses erreurs commises par les élèves en classe semblent être en relation avec une difficulté à inhiber ce qu'ils ont précédemment appris (Houdé & Borst, 2014). C'est par exemple ce qu'on observe en dictée, lorsque les élèves écrivent « J'ai quatre drones, je les pilote**s** régulièrement. », en justifiant cette conjugaison du verbe piloter par la stratégie « après les je mets un s ». Cette réponse est donc le résultat d'une stratégie heuristique, une stratégie automatique qui fonctionne très bien, très souvent, mais pas toujours (Houdé, 1997b). Pour trouver la conjugaison correcte, il est nécessaire d'inhiber cette heuristique pour pouvoir utiliser l'algorithme de conjugaison, une stratégie exacte permettant de toujours obtenir la bonne réponse (*i.e.* le verbe s'accorde avec son sujet) (Lanoë et al., 2016).

Pour mesurer l'implication du CI dans la réalisation d'une tâche, il est possible d'utiliser l'amorçage négatif. Ce paradigme se fonde sur le fait que si une représentation, un processus ou une stratégie est inhibé dans un premier temps, alors l'activation de cette représentation, ce processus ou cette stratégie sera ensuite perturbée (Tipper, 1985). Ce dernier a été utilisé dans de nombreuses tâches où l'inhibition d'une heuristique était nécessaire pour réussir, et ce dans différents domaines scolaires : en littéracie (*e.g.* la généralisation en miroir ; Ahr, Houdé, & Borst, 2016; Borst, Ahr, Roell, & Houdé, 2015), en mathématiques (*e.g.* la conservation du nombre ; Houdé & Guichart, 2001) ou encore en raisonnement (*e.g.* l'inclusion des classes ; Perret, Paour, & Blaye, 2003). Cependant, par définition, l'utilisation de ce paradigme repose sur la réussite des participants aux incongruents (*i.e.* où l'utilisation de l'heuristique fait tomber dans un piège). Pour l'utiliser il est donc nécessaire de recruter des participants suffisamment experts pour réussir la tâche. De ce fait, les études utilisant le paradigme d'amorçage négatif ne nous donnent pas d'information sur la période précédant la réussite aux différents items, c'est-à-dire la période où les élèves réussissent à utiliser leur heuristique mais échouent pour l'inhiber

lorsque cela est nécessaire. Ce paradigme ne nous permet donc pas de connaître la période sensible où les élèves seraient les plus à même de bénéficier d'une intervention pédagogique adaptée. La définition de cette période nécessite donc de mesurer les performances des individus aux items congruents (*i.e.* où l'utilisation de l'heuristique permet d'obtenir la bonne réponse) et aux items incongruents (*i.e.* où l'utilisation de l'heuristique ne permet pas d'obtenir la bonne réponse), et ce au fil du temps.

Dans cette seconde étude, nous cherchons à mieux connaître les erreurs heuristiques que font les élèves en classe et trouver leur période sensible, en impliquant les enseignants dans le processus de recherche. Par le biais d'une recherche participative, nous avons demandé aux enseignants de la plateforme numérique et collaborative Lea.fr de proposer à leurs élèves du CE1 au CM2 de compléter une batterie d'exercices évaluant différentes heuristiques. Pour chaque heuristique étudiée, un exercice était proposé aux élèves avec des items congruents et des items incongruents. La période sensible permettant de proposer une intervention pédagogique autour de cette heuristique était définie pour une même classe d'âge, par une réussite aux items congruents et un échec aux items incongruents (*i.e.* une réussite aux items congruents et incongruents signifiait que les élèves de cette classe d'âge savaient inhiber leur heuristique, tandis qu'un échec à ces deux types d'items signifiait que les élèves ne disposaient pas des connaissances théoriques suffisantes leur permettant de réussir la tâche). Dans cette situation, on pouvait alors supposer que l'erreur des élèves était due à un manque d'inhibition de l'heuristique.

Par le biais d'une enquête préliminaire adressée aux enseignants de Lea.fr, nous avons souhaité connaître les heuristiques que les élèves commettaient en classe. L'objectif de cette enquête était que les enseignants, grâce à leur observation en classe, recensent les erreurs systématiques faites par les élèves en classe. Pour cela, nous avons formés les enseignants à la définition et la reconnaissance d'une heuristique. Nous leur avons ensuite demandé d'observer

les élèves en classe et de relever toutes leurs erreurs qui pourraient être dues à une heuristique, avec le contexte (*i.e.* Dans quel niveau de classe ? Dans quelle discipline ? Dans quel type d'exercice ? …) et la fréquence d'apparition (*i.e.* Quel est le pourcentage d'élèves concernés dans la classe ?). Nous avons reçu 92 propositions d'heuristiques que nous avons ensuite analysées au laboratoire. Le but de notre analyse était double. Le premier était d'identifier si les erreurs remontées par les enseignants étaient des erreurs dues à une heuristique ou non, et le second était de sélectionner plusieurs de ces heuristiques pour les explorer plus finement en classe.

Parmi les plusieurs dizaines de propositions des enseignants, nous avons retenu huit erreurs systématiques repérées dans les classes allant du CE1 au CM2. La première portait sur la comparaison de nombres décimaux. Les enseignants nous ont remonté que les élèves de CM1 et CM2 échouaient dans la comparaison de nombres décimaux et pensaient que 1,317 était plus grand que 1,7 car 317 était plus grand que 7. Cette erreur est déjà connue dans la littérature scientifique et relèverait de deux biais : le biais du nombre entier (*i.e.* la tendance à appliquer les propriétés des nombres entiers aux nombres rationnels ; Ni & Zhou, 2005) un biais visuo-spatial (*i.e.* plus le nombre est long visuellement plus il est grand) (Roell, Viarouge, Hilscher, Houdé, & Borst, 2019; Roell, Viarouge, Houdé, & Borst, 2017; Roell, Viarouge, Houdé, et al., 2019). La seconde heuristique sélectionnée était proche de celle-ci et concernait la comparaison de fractions. Les enseignants nous ont indiqué que les élèves de CM1 et CM2 échouaient dans la comparaison de fractions lorsque les numérateurs de ces dernières étaient identiques. Ils indiquaient donc que 1/7 était plus grand que 1/3 car 7 était plus grand que 3. Cette heuristique relevait également du biais du nombre entier (Rossi et al., 2019). La troisième heuristique retenue portait sur la multiplication par 10. Les enseignants de CM1 et CM2 ont indiqué que les élèves utilisaient la règle « quand je multiplie par 10 je rajoute un 0 » avec des items décimaux (*e.g.* 12,5 x 10 = 12,50). Cette stratégie fonctionne très bien avec les nombres entiers

mais fait tomber dans un piège lorsque le nombre à multiplier est un nombre décimal. La quatrième heuristique choisie concernait la soustraction avec retenue chez les élèves du CE1 au CM2. Lorsqu'on leur demandait de résoudre la soustraction suivante : 25 – 18, les élèves avaient tendance à répondre 13 car ils utilisaient la règle « toujours soustraire le plus petit chiffre au plus grand » et faisaient donc dans ce cas 8 – 5 plutôt que 5 – 8, alors que cette règle ne permet pas de réussir lorsque la soustraction demande l'utilisation d'une retenue. La cinquième heuristique relevée par les enseignants concernait les accords sujet-verbe dans les phrases du type « Je les peigne » où les élèves du CE2 au CM2 plaçaient un s à la fin de peigne car ce dernier était précédé de les. Cette erreur est connue de la littérature et le besoin d'inhibition chez les enfants, les adolescents et les adultes pour réussir, a déjà été démontré (Lanoë et al., 2016). Les enseignants ont également observé cette erreur dans des phrases telle que « Je vous dirai » où les élèves écrivent « direz » car le verbe est précédé par vous. La sixième heuristique sélectionnée dans les propositions des enseignants est proche de la précédente. Les élèves de CM1 et CM2 avaient tendance à accorder un verbe au pluriel lorsque le sujet de la phrase représentait une entité plurielle (*e.g.* la classe de CE2, l'équipe de football, l'ensemble des musiciens). Ainsi, les élèves écrivaient « Toute la classe jou**ent** dehors ». La septième heuristique choisie concerne le chiffre des unités. Les élèves de CM1 et CM2 surgénéralisaient la stratégie « le chiffre des unités et le dernier chiffre du nombre » fonctionnelle avec les nombres entiers, en l'appliquant aux nombres décimaux. Ainsi, lorsqu'on leur demandait d'identifier le chiffre des unités de 12,4, ces derniers désignaient le 4. Enfin, la dernière heuristique sélectionnée portait sur les problèmes arithmétiques à contenus verbaux. Les enseignants nous ont reporté la difficulté des élèves du CE1 au CM1 à résoudre les problèmes du type « Benjamin a 14 bonbons. Il a 5 bonbons de plus qu'Audrey. Combien de bonbons a Audrey ? ». En effet, les élèves effectuaient une addition et répondaient qu'Audrey avait 19 bonbons car il y avait le mot « plus » dans le problème. Pour réussir, il était nécessaire

d'inhiber l'heuristique trompeuse « additionner si plus, soustraire si moins » (Lubin et al., 2013).

Cette enquête préliminaire a donc permis de mettre en lumière huit erreurs heuristiques régulièrement commises par les élèves du CE1 au CM2. Cette seconde étude vise donc à analyser plus finement ces heuristiques en proposant aux élèves de répondre à des items congruents et incongruents pour chacune d'elle. Une batterie d'exercices a donc été proposée aux élèves en fonction de leur niveau (*cf.* Tableau 3). Pour qu'une erreur soit considérée comme une erreur heuristique, il était indispensable que les élèves aient connaissance de l'algorithme à utiliser pour réussir. De ce fait, les niveaux de classe indiqués dans ce tableau l'étaient à titre indicatif et il était alors de la responsabilité de l'enseignant de proposer ou non l'exercice à ses élèves. Ainsi, les enseignants proposaient un exercice aux élèves uniquement si la notion-clé de celui-ci avait précédemment été abordée en classe (*e.g.* un enseignant de CM1 n'ayant pas encore abordé les nombres décimaux en classe ne proposait donc pas cet exercice à ses élèves). Cette deuxième étude permettait donc de calculer, pour chaque classe d'âge, le pourcentage de bonnes réponses aux items congruents et incongruents, et ainsi observer la période sensible pour chacune des heuristiques.

Méthode

Participants

Six cent quarante-huit enfants du CE1 au CM2 ont participé à cette étude : 100 CE1 (54 filles, 7,8 ± 0,3 ans), 62 CE2 (28 filles, 8,9 ± 0,5 ans), 193 CM1 (98 filles, 9,8 ± 0,3 ans) et 293 CM2 (139 filles, 10,8 ± 0,4 ans) (*cf.* Tableau 4) L'étude a été menée en accord avec les normes nationales et internationales qui régissent la participation d'humains à la recherche. La

participation des enfants se faisait sur le volontariat, après l'obtention d'un consentement éclairé des responsables légaux des enfants.

Tableau 3. Les exercices conseillés en fonction du niveau de classe des enfants.

	CE1	CE2	CM1	CM2
La comparaison de nombres décimaux			X	X
La comparaison de fractions			X	X
La multiplication par 10			X	X
La soustraction à retenues	X	X	X	X
Les accords après les et vous		X	X	X
Les accords en nombre			X	X
Le chiffre des unités			X	X
Les problèmes arithmétiques à contenus verbaux	X	X	X	X

X = l'exercice était proposé aux élèves de cet âge

Tableau 4. Répartition des enfants ayant réalisé les huit exercices en fonction de leur niveau de classe.

	CE1	CE2	CM1	CM2	Total
La comparaison de nombres décimaux			88	272	360 (10,7 ± 0,5 ans)
La comparaison de fractions			23	283	306 (10,7 ± 0,5 ans)
La multiplication par 10			93	262	355 (10,7 ± 0,5 ans)
La soustraction à retenues	100	62	186	288	636 (9,8 ± 1,2 ans)
Les accords après les et vous		51	187	263	501 (10,3 ± 0,7 ans)
Les accords en nombre			189	286	475 (10,5 ± 0,6 ans)
Le chiffre des unités			147	286	433 (10,5 ± 0,6 ans)
Les problèmes arithmétiques à contenus verbaux	98	62	191	263	614 (9,8 ± 1,2 ans)

Matériel et procédure

Les enseignants (N = 27) ont été recrutés sur la plateforme pédagogique et collaborative Lea.fr. Par le biais de la plateforme, nous avons pu réaliser l'enquête préliminaire, expliquer aux enseignants les objectifs du projet ainsi que nos hypothèses, les former aux concepts théoriques et méthodologiques nécessaires, partager le matériel nécessaire pour chacun des exercices, récolter les données des élèves recueillies par les enseignants et leur communiquer les résultats de l'étude.

Pour chacune des huit heuristiques sélectionnées, nous avons construit un exercice papier-crayon à réaliser en groupe classe dans un délai maximum de 15 minutes. Chaque exercice était composé d'énoncés congruents où utiliser l'heuristique permet d'obtenir la bonne réponse et d'énoncés incongruents où utiliser la stratégie heuristique fait tomber dans un piège. Le nombre d'énoncés par exercice a été défini de telle sorte qu'ils soient assez nombreux pour pouvoir réaliser des analyses statistiques, mais pas trop nombreux pour que les élèves ne décrochent pas avant la fin de l'exercice. Pour chacun des exercices, les enseignants recueillaient le nombre de bonnes réponses en fonction du type d'items.

L'ensemble des exercices était proposé aux enseignants avec les âges conseillés. Ils avaient ensuite cinq semaines pour les proposer à leurs élèves, compléter le tableau de récolte des données et nous le transmettre. Chacun des exercices étant indépendant, aucun ordre n'était établi pour les réaliser.

La comparaison de nombres décimaux

L'exercice proposé aux CM1 et CM2 était composé de 18 paires de nombres décimaux (*cf.* Annexe 4). Pour chaque paire, les élèves devaient entourer le nombre décimal le plus grand.

Il y en avait 6 congruentes où le nombre décimal le plus grand est celui qui a le plus de chiffres dans la partie décimale (*e.g.* 0,751 *vs.* 0,2), 6 neutres où les deux nombres décimaux ont le même nombre de chiffres dans la partie décimale (*e.g.* 0,62 *vs.* 0,56) et 6 incongruentes où le nombre décimal le plus petit est celui qui a le plus de chiffres dans la partie décimale (*e.g.* 0,6 *vs.* 0,521). Tous les nombres décimaux étaient inférieurs à 1 et avaient une partie décimale pouvant contenir 1, 2 ou 3 chiffres. Pour chaque type d'items, le niveau de difficulté de comparaison était contrôlé en manipulant la distance numérique entre les premiers chiffres de la partie décimale de chaque paire (la distance était de 1 ou 5).

La comparaison de fractions

Dans cet exercice proposé aux élèves de CM1 et CM2, 12 paires de fractions étaient exposées (*cf.* Annexe 5). La consigne était d'entourer la fraction la plus grande pour chacune des paires. Il y avait 6 paires congruentes où les dénominateurs étaient communs (*e.g.* 3/4 *vs.* 1/4) et 6 paires incongruents où les numérateurs étaient communs (*e.g.* 1/4 *vs.* 1/3). Les composants des fractions allaient de 1 à 5.

La multiplication par 10

Les élèves de CM1 et CM2 devaient résoudre 12 multiplications par 10 en calcul mental (*cf.* Annexe 6). Il y avait 6 multiplications congruentes où le chiffre à multiplier par 10 était un nombre entier (*e.g.* 72 x 10) et de 6 multiplications incongruentes où le nombre à multiplier par 10 était un nombre décimal (*e.g.* 10 x 5,6). Les nombres décimaux à multiplier contenaient un chiffre dans la partie décimale. L'ordre des nombres dans l'opération était contrebalancé (*i.e.* 10 x N ou N x 10).

La soustraction avec retenue

Dans cet exercice, les élèves du CE1 au CM2 devaient résoudre 12 soustractions (*cf.* Annexe 7). Il y avait 6 soustractions congruentes où le chiffre des unités du premier nombre

était plus grand que le chiffre des unités du second nombre à soustraire (*e.g.* 54 – 12) et 6 opérations incongruents où le chiffre des unités du premier nombre était plus petit que le chiffre des unités du second nombre (*e.g.* 71 – 26). Dans les items incongruents, l'utilisation de la retenue était nécessaire. Les opérations proposées aux élèves de CE1 et CE2 contenaient des nombres à deux chiffres, tandis que celles proposées aux élèves de CM1 et CM2 contenaient des nombres allant de 2 à 3 chiffres. La littérature ayant montré que la stratégie utilisée par les élèves était différente en fonction du format de présentation (Trbovich & Fevre, 2003), chaque type d'item (*i.e.* congruent et incongruent) était présenté de deux façons différentes : horizontale ou verticale.

Les accords après les et vous

Cet exercice, proposé aux élèves de CE2, CM1 et CM2, se composait de 16 énoncés (*cf.* Annexe 8). Il y en avait 8 congruents, où le sujet et le verbe de la phrase se suivaient (*e.g.* Je mange les fraises) et 8 incongruentes où le sujet et le verbe de la phrase étaient séparés par « les » ou « vous » (*e.g.* Je vous rendrai les clés). L'exercice était présenté comme un exercice de complétion de phrases (*e.g.* Je vous _____ les clés.). Les 16 phrases étaient écrites sur une feuille et les élèves n'avaient plus qu'à compléter l'espace vide, correspondant au mot cible, grâce à la dictée de l'enseignant.

Les accords en nombre

L'exercice se composait de 15 phrases à compléter par les CE2, CM1 et CM2 (*cf.* Annexe 9). Il y avait 5 phrases congruentes au singulier où le sujet de la phrase était singulier et représentait une seule personne (*e.g.* Le pirate cherche un trésor), 5 phrases congruentes au pluriel où le sujet de la phrase était un groupe nominal pluriel (*e.g.* Les ouvriers travaillent vite) et 5 phrases incongruentes où le sujet de la phrase était singulier mais représentait plusieurs personnes (*e.g.* La classe de CE2 travaille). Les termes utilisés dans les phrases incongruentes

étaient : la troupe de théâtre, la classe de CE2, toute l'école, le groupe et l'équipe de football. Les phrases étaient dictées par l'enseignant pour permettre aux élèves de compléter le verbe (*e.g.* La classe de CE2 _____.).

Le chiffre des unités

Cet exercice a été créé pour des élèves de CM1 et CM2 et contenait 18 nombres (*cf.* Annexe 10). La consigne donnée était d'entourer le chiffre des unités. Il y avait 6 nombres congruents où le chiffre des unités était le dernier chiffre (*e.g.* 2739), 12 nombres incongruents où le dernier chiffre ne correspondait pas au chiffre des unités (*e.g.* 1,632). Les items incongruents étaient plus nombreux dans le but de pouvoir varier au maximum la position de la virgule dans le nombre décimal. Ainsi, la partie entière et la partie décimale pouvaient être de 1 à 3 chiffres. Concernant les nombres entiers des items congruents, ces derniers allaient de 2 à 4 chiffres.

Les problèmes arithmétiques à contenus verbaux

Cet exercice proposé aux élèves du CE1 au CM2 contenait 12 problèmes à résoudre (*cf.* Annexe 11). Il y en avait 6 congruents, où le terme relationnel correspondait à l'opération à réaliser (*e.g.* Hélène a 14 fraises. Charles a 7 fraises de plus qu'Hélène. Combien de fraises a Charles ?) et 6 incongruents où le terme relationnel ne correspondait pas à l'opération à réaliser (*e.g.* Juliette a 8 feutres. Elle a 3 feutres de plus que Thomas. Combien de feutres a Thomas ?). Pour chaque type d'items, il y avait autant de « plus » que de « moins » et donc autant d'addition que de soustraction.

Résultats

Les huit exercices ont été analysés indépendamment les uns des autres. Pour chacun d'eux, nous avons calculé un pourcentage de bonnes réponses aux différents types d'items en

fonction du niveau de classe (*cf.* Tableau 5). Pour mesurer la différence de performance des élèves entre les différents items, nous avons utilisé des analyses de variance (ANOVA) et des tests de Student pour échantillons appariés. Nous avons alors utilisé l'Eta partiel au carré (η_p^2) et le d de Cohen (*d*) pour mesurer la taille des effets. Lorsque c'était nécessaire, les analyses *post-hoc* pour comparaisons appariées ont été réalisées à l'aide d'un test de Bonferroni. La performance à chaque item a ensuite été comparée à 50% par le biais d'un t de Student pour échantillon unique. Nous avons utilisé le *d* de Cohen pour mesurer la taille des effets.

Tableau 5. Moyennes du pourcentage de bonnes réponses des élèves en fonction du type d'items et du niveau pour chacun des huit exercices. Les écart-types sont entre parenthèses.

		CE1		CE2		CM1			CM2		
		Congruents	Incongruents	Congruents	Incongruents	Congruents	Incongruents	Neutres	Congruents	Incongruents	Neutres
La comparaison de nombres décimaux		-	-	-	-	91,1 (24)	11,7 (29)	91,9 (24)	90,7 (26)	57,6 (46)	95,3 (19)
La comparaison de fractions		-	-	-	-	-	-	-	87,2 (26)	47,6 (44)	-
La multiplication par 10		-	-	-	-	84,9 (28)	41,1 (41)	-	93,5 (20)	48,9 (48)	-
La soustraction avec retenue	Horizontale	74,1 (34)	37,3 (37)	80 (30)	49,4 (40)	85,3 (26)	39 (35)	-	89,5 (22)	51,1 (35)	-
	Verticale	83,5 (29)	26,3 (40)	95,5 (13)	59,8 (40)	93 (20)	59,6 (40)	-	93,8 (14)	81,4 (31)	-
Les accords après les et vous		-	-	33,8 (21)	36,8 (25)	51,7 (31)	42,3 (20)	-	71,4 (24)	46 (24)	-
Les accords en nombre		-	-	-	-	Singuliers 87,8 (20) Pluriels 48,4 (41)	68,7 (32)	-	Singuliers 92,9 (15) Pluriels 79 (31)	78,3 (28)	-
Le chiffre des unités		-	-	-	-	85,8 (31)	43,1 (45)	-	91,7 (22)	81,6 (35)	-
Les problèmes arithmétiques à contenus verbaux		74 (30)	47,1 (37)	86,4 (16)	50,5 (28)	86,9 (20)	61,3 (36)	-	93,9 (13)	77 (29)	-

La comparaison de nombres décimaux

Une 3 (Type d'items : congruent *vs.* neutre *vs.* incongruent) x 2 (Niveau : CM1 *vs.* CM2) ANOVA sur le nombre de bonnes réponses à l'exercice de comparaison de nombres décimaux montrait un effet d'interaction entre le type d'items et le niveau, $F(2,716) = 48,26$, $p < .001$, η_p^2

= .12 (*cf.* Figure 14). Il y avait un effet principal du type d'items, $F(2,716) = 324,9$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .47$, tels que les items neutres sont mieux réussis que les items congruents, qui sont eux-mêmes mieux réussis que les items incongruents. Il y avait également un effet principal du niveau, $F(1,358) = 46,26$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .11$, tels que les élèves de CM2 ont de meilleures performances que les élèves de CM1.

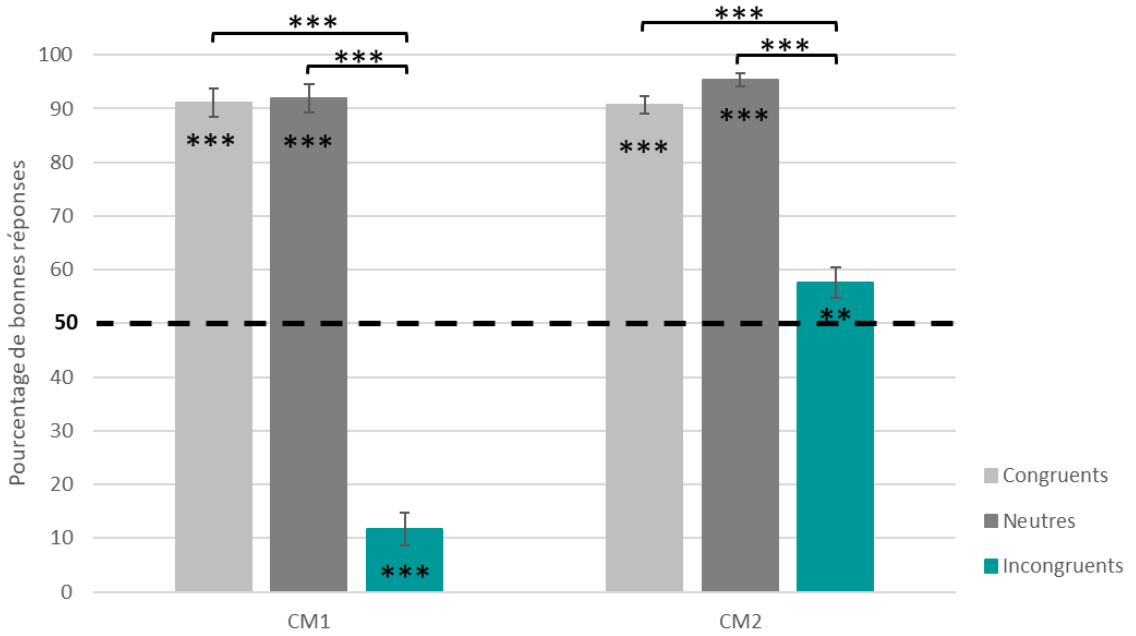


*Figure 14. La moyenne du pourcentage de bonnes réponses à l'exercice de comparaison des nombres décimaux en fonction du type d'items pour les élèves de CM1 et CM2. Les barres d'erreurs indiquent l'erreur-type de la moyenne. ** p <.01, *** p <.001.*

Pour les élèves de CM1, on observe un effet principal du type d'items, $F(2,174) = 292$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .77$, telle que la performance aux items incongruents est inférieure à celle des items congruents $t(87) = 17,16$, $p < .001$, $d = 1,83$, et neutres $t(87) = 17,33$, $p < .001$, $d = 1,84$. Il n'existe cependant pas de différence significative entre les performances aux items congruents et aux items neutres $t(87) < 1$, $p = 1$. De plus, on observe que la performance des élèves aux items congruents est supérieure à 50%, $t(87) = 15,83$, $p < .001$, $d = 1,69$, ainsi que pour les items neutres, $t(87) = 18,82$, $p < .001$, $d = 1,69$, alors que la performances des élèves aux items incongruents est significativement inférieure à 50%, $t(87) = 12,22$, $p < .001$, $d = 1,3$.

Pour les élèves de CM2, on observe un effet principal du type d'items, $F(2,542) = 116,1$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .3$, telle que la performance aux items neutres est supérieure à celle des items congruents $t(271) = 3,79$, $p < .001$, $d = 0,23$, et incongruents $t(271) = 12,51$, $p < .001$, $d = 0,75$. Les items congruents sont également mieux réussis que les items incongruents $t(271) = 9,82$, $p < .001$, $d = 0,59$. De plus, on observe que la performance des élèves aux items congruents est significativement supérieure à 50%, $t(271) = 25,21$, $p < .001$, $d = 1,53$, ainsi que pour les items neutres, $t(271) = 38,59$, $p < .001$, $d = 2,34$. Aussi, la performance des élèves aux items incongruents est significativement supérieure à 50%, $t(271) = 2,7$, $p = .007$, $d = 0,16$.

La comparaison de fractions

Les données pour les élèves de CM1 n'ont pas été analysées car seule une petite partie de l'échantillon (N=23) a complété cet exercice.

Pour les élèves de CM2, on observe un effet principal du type d'items, $t(283) = 12,86$, $p < .001$, $d = 0,76$, telle que la performance aux items congruents est meilleure qu'aux items incongruents (*cf.* Figure 15). De plus, on observe que la performance des élèves aux items congruents est significativement supérieure à 50%, $t(238) = 23,99$, $p < .001$, $d = 1,42$, et que la performance des élèves aux items incongruents n'est significativement pas inférieure à 50%, $t(283) < 1$, $p = .182$.

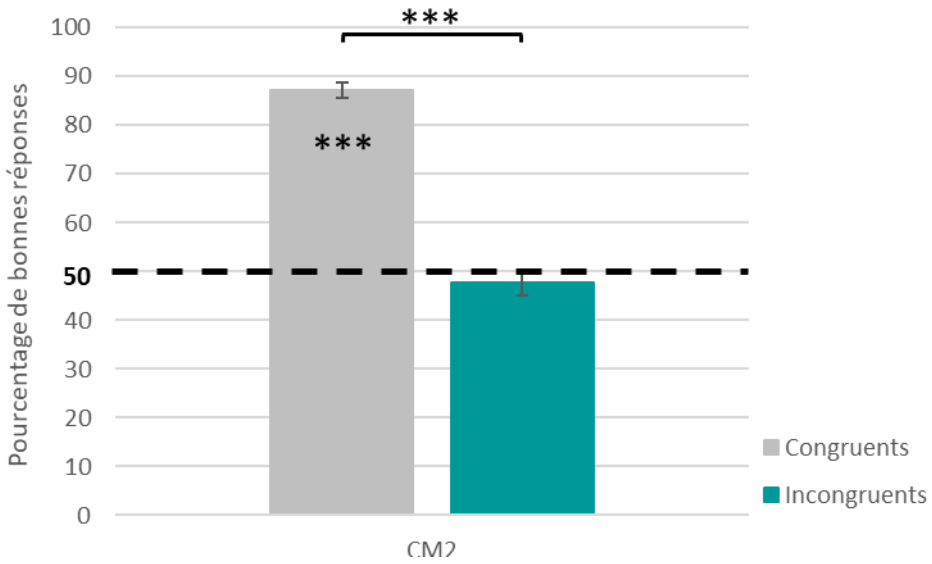


*Figure 15. La moyenne du pourcentage de bonnes réponses à l'exercice de comparaison des fractions en fonction du type d'items pour les élèves de CM2. Les barres d'erreurs indiquent l'erreur-type de la moyenne. *** p <.001*

La multiplication par 10

Une 2 (Type d'items : congruent *vs.* incongruent) x 2 (Niveau : CM1 *vs.* CM2) ANOVA sur le nombre de bonnes réponses à l'exercice de multiplication par 10 montrait un effet d'interaction entre le type d'items et le niveau, $F(1,353) = 8,64$, $p = .003$, $\eta_p^2 = .02$ (*cf.* Figure 16). Il y avait un effet principal du type d'items, $F(1,353) = 318,26$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .47$, tels que les items congruents sont mieux réussis que les items incongruents, et un effet principal du niveau, $F(1,353) = 29,97$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .07$, tels que les élèves de CM2 ont de meilleures performances que les élèves de CM1.

Pour les élèves de CM1, on observe un effet principal du type d'items, $t(92) = 12,36$, $p < .001$, $d = 1,28$, telle que la performance des élèves aux items congruents est meilleure qu'aux items incongruents. De plus, on observe que la performance des élèves aux items congruents est significativement supérieure à 50%, $t(92) = 11,8$, $p < .001$, $d = 1,22$, alors que la performance des élèves aux items incongruents est significativement inférieure à 50%, $t(92) = 6,39$, $p < .001$, $d = 0,66$.

Pour les élèves de CM2, on observe un effet principal du type d'items, t(261) = 14,45, p < .001, d = 0,89, telle que la performance aux items congruents est meilleure qu'aux items incongruents. De plus, on observe que la performance des élèves aux items congruents est significativement supérieure à 50%, t(261) = 34,89, p < .001, d = 2,155, alors que la performance des élèves aux items incongruents n'est significativement pas inférieure à 50%, t(261) < 1, p = .36.

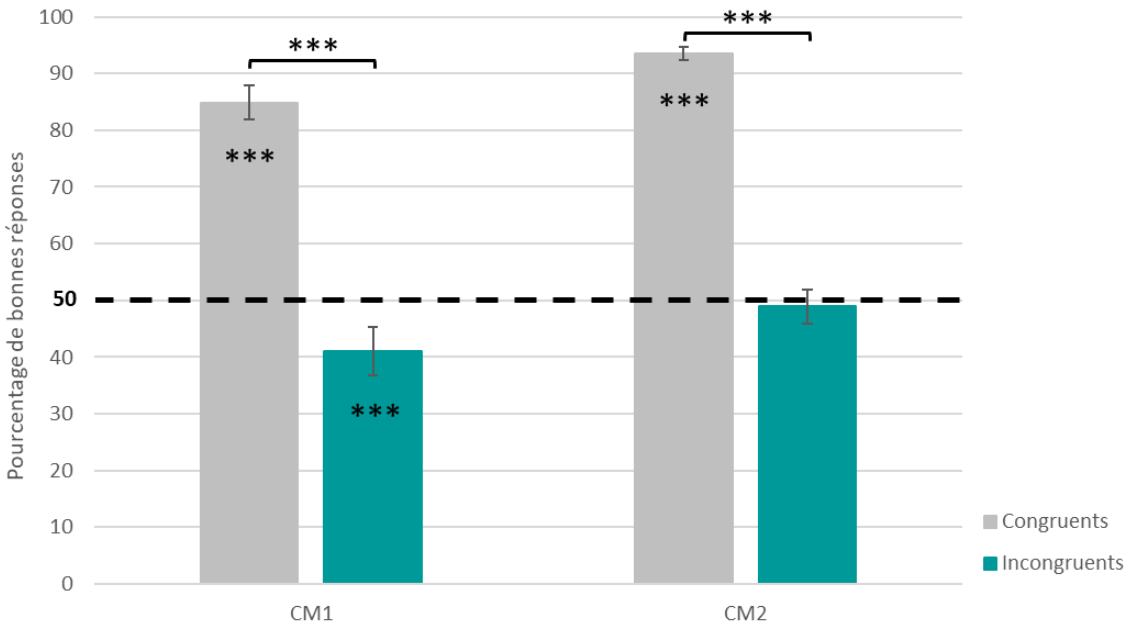


*Figure 16. La moyenne du pourcentage de bonnes réponses à l'exercice de multiplication par 10 en fonction du type d'items pour les élèves de CM1 et CM2. Les barres d'erreurs indiquent l'erreur-type de la moyenne. *** p <.001*

La soustraction avec retenue

Une 2 (Type d'items : congruent *vs.* incongruent) x 2 (Présentation : horizontale *vs.* verticale) x 4 (Niveau : CE1 *vs.* CE2 *vs.* CM1 *vs.* CM2) ANOVA sur le nombre de bonnes réponses à l'exercice de soustraction avec retenue montrait un effet d'interaction entre le type d'items, la présentation et le niveau, $F(3,632) = 25,94$, p < .001, η_p^2 = .11 (*cf.* Figure 17). Il y

avait un effet principal du type d'items, $F(1,632) = 648{,}22$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .5$, tels que les items congruents sont mieux réussis que les items incongruents, un effet principal de la présentation, $F(1,632) = 5{,}43$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .12$, tels que les items verticaux sont mieux réussis que les items horizontaux, ainsi qu'un effet principal du niveau $F(3,632) = 32{,}84$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .13$.

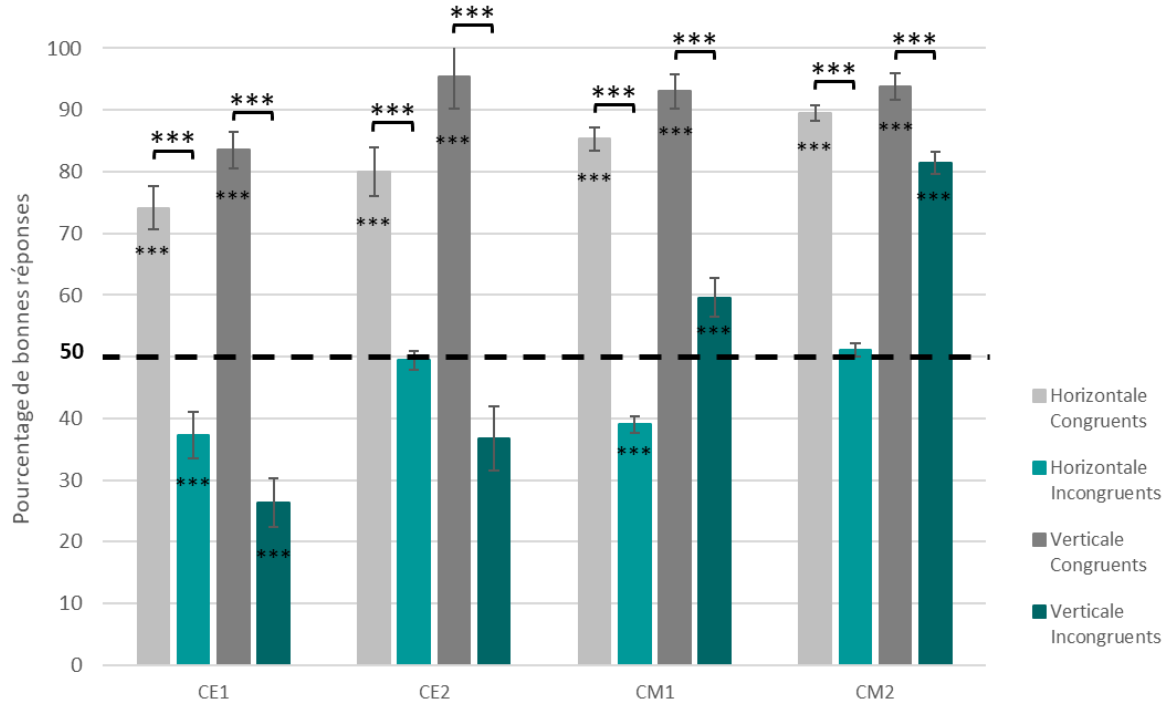


*Figure 17. La moyenne du pourcentage de bonnes réponses à l'exercice de soustraction avec retenue en fonction du type d'items pour les élèves de CE1, CE2, CM1 et CM2. Les barres d'erreurs indiquent l'erreur-type de la moyenne. *** p <.001*

Pour chaque niveau de classe, nous avons réalisé une 2 (Type d'items : congruent *vs.* incongruent) x 2 (Présentation : horizontale *vs.* verticale) ANOVA. Nous avons utilisé l'Eta partiel au carré (η_p^2) pour mesurer la taille des effets. Les analyses *post-hoc* pour comparaisons appariées ont été réalisées à l'aide d'un test de Bonferroni. La performance à chaque item a ensuite été comparée à 50% par le biais d'un t de Student pour échantillon unique. Nous avons utilisé le d de Cohen pour mesurer la taille des effets.

Pour les élèves de CE1, on observe un effet d'interaction entre le type d'items (congruent ou incongruent) et le type de présentation (horizontale ou verticale), $F(1,99) =$

14,82, p <.001, η_p^2 = .13. Il existe un effet principal du type d'items, $F(1,99) = 190,99$, $p < .001$, η_p^2 = .66, tels que les items congruents sont mieux réussis que les items incongruents. Cependant, il n'existe pas d'effet principal du type de présentation, $F(1,99) < 1$, $p = .782$. Pour les items horizontaux, on observe que les items congruents sont mieux réussis que les items incongruents, t(99) = 8,491, $p < .001$, $d = 0,84$. De plus, la performance des élèves aux items congruents est significativement supérieure à 50%, t(99) = 6,85, $p < .001$, $d = 0,68$, alors que la performance des élèves aux items incongruents est significativement inférieure à 50%, t(99) = 3,33, $p < .001$, $d = 0,33$. Pour les items verticaux, on observe que les items congruents sont mieux réussis que les items incongruents, t(99) = 13,34, $p < .001$, $d = 1,33$. De plus, la performance des élèves aux items congruents est significativement supérieure à 50%, t(99) = 11,41, $p < .001$, $d = 1,14$, alors que la performance des élèves aux items incongruents est significativement inférieure à 50%, t(99) = 5,84, $p < .001$, $d = 0,58$.

Pour les élèves de CE2, on observe un effet d'interaction entre le type d'items (congruent ou incongruent) et le type de présentation (horizontale ou verticale) non significatif, $F(1,61) < 1$, $p = .441$. Il existe cependant un effet principal du type d'items, $F(1,61) = 52,52$, $p < .001$, η_p^2 = .46, tels que les items congruents sont mieux réussis que les items incongruents. On constate également un effet principal du type de présentation, $F(1,61) = 13,54$, $p < .001$, η_p^2 = .18, tels que les items verticaux sont mieux réussis que les items horizontaux. Pour les items horizontaux, on observe que les items congruents sont mieux réussis que les items incongruents, t(61) = 5,13, $p < .001$, $d = 0,65$. De plus, la performance des élèves aux items congruents est significativement supérieure à 50%, t(61) = 7,71, $p < .001$, $d = 0,98$, alors que la performance des élèves aux items incongruents n'est significativement pas inférieure à 50%, t(61) < 1, p = .451. Pour les items verticaux, on observe que les items congruents sont mieux réussis que les items incongruents, t(61) = 6,87, $p < .001$, $d = 0,87$. De plus, on observe que la performance des élèves aux items congruents est significativement supérieure à 50%, t(61) = 28,06, $p < .001$,

d = 3,56, alors que la performance des élèves aux items incongruents n'est pas significativement différente de 50%, t(61) = 1,9, p = .06.

Pour les élèves de CM1, on observe un effet d'interaction entre le type d'items (congruent ou incongruent) et le type de présentation (horizontale ou verticale), $F(1,185)$ = 12,7, $p < .001$, η_p^2 = .06. Il existe un effet principal du type d'items, $F(1,185)$ = 300, $p < .001$, η_p^2 = .61, tels que les items congruents sont mieux réussis que les items incongruents. On constate également un effet principal du type de présentation, $F(1,185)$ = 67,05, $p < .001$, η_p^2 = .26, tels que les items verticaux sont mieux réussis que les items horizontaux. Pour les items horizontaux, on observe que les items congruents sont mieux réussis que les items incongruents, t(185) = 16,38, $p < .001$, d = 1,2. De plus, la performance des élèves aux items congruents est significativement supérieure à 50%, t(185) = 18,79, $p < .001$, d = 1,37, et la performance des élèves aux items incongruents est significativement inférieure à 50%, t(185) = 4,108, $p < .001$, d = 0,3. Pour les items verticaux, on observe que les items congruents sont mieux réussis que les items incongruents, t(185) = 11,06, $p < .001$, d = 0,81. De plus, on observe que la performance des élèves aux items congruents est significativement supérieure à 50%, t(185) = 30,05, $p < .001$, d = 2,2, alors que la performance des élèves aux items incongruents est significativement supérieure à 50%, t(185) = 3,07, p = .001, d = 0,22.

Pour les élèves de CM2, on observe un effet d'interaction entre le type d'items (congruent ou incongruent) et le type de présentation (horizontale ou verticale), $F(1,287)$ = 97,64, $p < .001$, η_p^2 = .25. Il existe un effet principal du type d'items, $F(1,287)$ = 248,94, $p < .001$, η_p^2 = .46, tels que les items congruents sont mieux réussis que les items incongruents. On constate également un effet principal du type de présentation, $F(1,287)$ = 153,66, $p < .001$, η_p^2 = .34, tels que les items verticaux sont mieux réussis que les items horizontaux. Pour les items horizontaux, on observe que les items congruents sont mieux réussis que les items incongruents, t(287) = 16,44, $p < .001$, d = 0,96. De plus, la performance des élèves aux items congruents est

significativement supérieure à 50%, t(287) = 30,01, $p < .001$, $d = 1,76$, alors que la performance des élèves aux items incongruents n'est significativement pas différente de 50%, $t(287) < 1$, $p = .0627$. Pour les items verticaux, on observe que les items congruents sont mieux réussis que les items incongruents, t(287) = 6,92, $p < .001$, $d = 0,4$. De plus, on observe que la performance des élèves aux items congruents est significativement supérieure à 50%, t(287) = 45,52, $p < .001$, $d = 2,68$, tout comme la performance des élèves aux items incongruents, t(287) = 17,42, $p = .001$, $d = 1,02$.

Les accords après les et vous

Une 2 (Type d'items : congruent *vs.* incongruent) x 3 (Niveau : CE2 *vs.* CM1 *vs.* CM2) ANOVA sur le nombre de bonnes réponses à l'exercice d'accords après les et vous montrait un effet d'interaction entre le type d'items et le niveau, $F(2,498) = 19,26$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .07$ (*cf.* Figure 18). Il y avait un effet principal du type d'items, $F(1,498) = 27,5$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .05$, tels que les items congruents sont mieux réussis que les items incongruents, et un effet principal du niveau, $F(2,498) = 47,78$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .16$, tels que les élèves de CM2 ont de meilleures performances que les élèves de CM1, qui eux-mêmes ont de meilleurs performances que les élèves de CE2.

Pour les élèves de CE2, on observe qu'il n'existe pas d'effet principal du type d'items, $t(50) < 1$, $p = .573$. De plus, on observe que la performance des élèves aux items congruents est significativement inférieure à 50%, t(50) = 5,33, $p < .001$, d = 0,75, tout comme la performance aux items incongruents, t(50) = 3,7, $p < .001$, $d = 0,51$.

Pour les élèves de CM1, on observe un effet principal du type d'items, t(186) = 3,54, $p < .001$, $d = 0,25$, tels que les élèves sont plus performants aux items congruents qu'incongruents. De plus, on observe que la performance des élèves aux items congruents n'est pas

significativement supérieure à 50%, t(186) < 1, p = .226, bien que la performance des élèves aux items incongruents soit significativement inférieure à 50%, t(186) = 5,07, p < .001, d = 0,37.

Pour les élèves de CM2, on observe un effet principal du type d'items, t(262) = 11,68, p < .001, d = 0,72, tels que les élèves sont plus performants aux items congruents qu'incongruents. De plus, on observe que la performance des élèves aux items congruents est significativement supérieure à 50%, t(262) = 14,07, p <.001, d = 0,89, et la performance des élèves aux items incongruents est significativement inférieure à 50%, t(262) = 2,62, p = .005, d = 0,16.

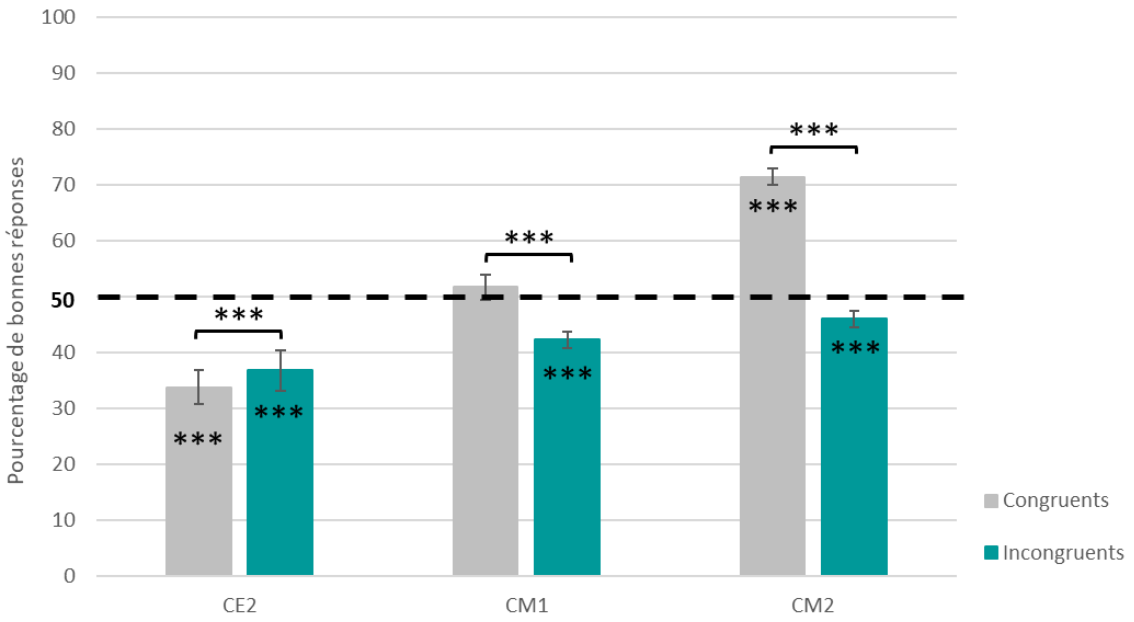


*Figure 18. La moyenne du pourcentage de bonnes réponses à l'exercice d'accord après les et vous, en fonction du type d'items pour les élèves de CE2, CM1 et CM2. Les barres d'erreurs indiquent l'erreur-type de la moyenne. *** p <.001*

Les accords en nombre

Une 3 (Type d'items : congruent singulier *vs.* congruent pluriel *vs.* incongruent) x 2 (Niveau : CM1 *vs.* CM2) ANOVA sur le nombre de bonnes réponses à l'exercice d'accord en nombre montrait un effet d'interaction entre le type d'items et le niveau, F(2,944) = 74,31, p <

.001, η_p^2 = .13 (*cf.* Figure 19). Il y avait un effet principal du type d'items, $F(2,944) = 794,83$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .62$, tels que les items congruents singuliers sont mieux réussis que les items incongruents, eux-mêmes mieux réussis que les items congruents pluriels. De plus, il y avait un effet principal du niveau, $F(1,472) = 85,79$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .15$, tels que les élèves de CM2 ont de meilleures performances que les élèves de CM1.

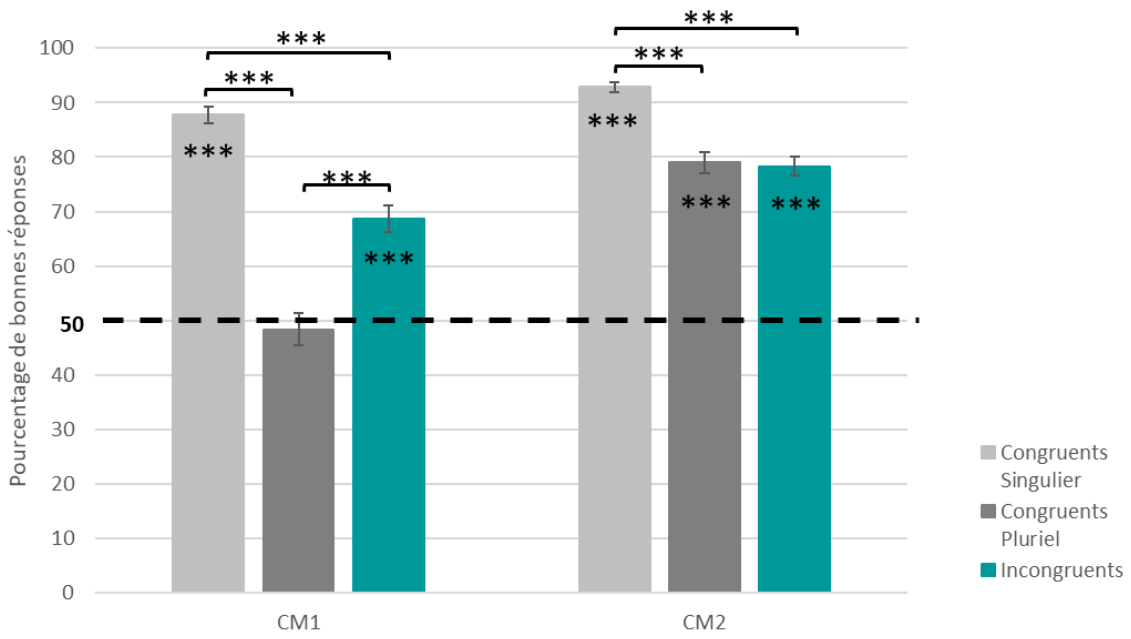


*Figure 19. La moyenne du pourcentage de bonnes réponses à l'exercice d'accord en nombre, en fonction du type d'items pour les élèves de CM1 et CM2. Les barres d'erreurs indiquent l'erreur-type de la moyenne. *** p <.001.*

Pour les élèves de CM1, on observe un effet principal du type d'items, $F(2,376) = 86,04$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .31$. Les items congruents singuliers sont mieux réussi que les items congruents pluriels, $t(188) = 14,07$, $p < .001$, $d = 1,02$ et incongruents $t(188) = 8,94$, $p < .001$, $d = 0,65$. De plus, les items incongruents sont mieux réussis que les items congruents pluriels, $t(188) = 5,29$, $p < .001$, $d = 0,38$. Enfin, on observe que la performance des élèves aux items congruents singuliers est significativement supérieure à 50%, $t(188) = 25,02$, $p < .001$, $d = 1,82$, ainsi que celle aux items incongruents, $t(188) = 7,87$, $p < .001$, $d = 0,57$. En revanche, la performance aux items congruents pluriels ne diffère pas significativement de 50%, $t(188) < 1$, $p = .59$.

Pour les élèves de CM2, on observe un effet principal du type d'items, $F(2,570) = 29,9$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .09$. Les items congruents singuliers sont mieux réussi que les items congruents pluriels, $t(285) = 6,88$, $p < .001$, $d = 0,40$ et incongruents $t(285) = 8,66$, $p < .001$, $d = 0,51$. Cependant, il n'existe pas de différence significative des performances entre les items incongruents et les items congruents pluriels, $t(285) < 1$, $p = 1$. De plus, on observe que la performance des élèves aux items congruents singuliers est significativement supérieure à 50%, $t(285) = 46,61$, $p < .001$, $d = 2,69$, ce qui est également le cas pour les items congruents pluriels, $t(285) = 15,57$, $p < .001$, $d = 0,92$, et les items incongruents, $t(285) = 16,76$, $p < .001$, $d = 0,99$.

Le chiffre des unités

Une 2 (Type d'items : congruent *vs.* incongruent) x 2 (Niveau : CM1 *vs.* CM2) ANOVA sur le nombre de bonnes réponses à l'exercice de chiffre des unités montrait un effet d'interaction entre le type d'items et le niveau, $F(1,431) = 5,139$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .11$ (*cf.* Figure 20). Il y avait un effet principal du type d'items, $F(1,431) = 133,48$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .23$, tels que les items congruents sont mieux réussis que les items incongruents, et un effet principal du niveau, $F(1,431) = 80,89$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .15$, tels que les élèves de CM2 ont de meilleures performances que les élèves de CM1.

Pour les élèves de CM1, on observe un effet principal du type d'items, $t(146) = 9,21$, $p < .001$, $d = 0,76$, tels que les élèves sont plus performants aux items congruents qu'aux items incongruents. De plus, on observe que la performance des élèves aux items congruents est significativement supérieure à 50%, $t(146) = 14$, $p < .001$, $d = 1,15$, et la performance des élèves aux items incongruents est significativement inférieure à 50%, $t(146) = 1,85$, $p = .03$, $d = 0,15$.

Pour les élèves de CM2, on observe un effet principal du type d'items, $t(285) = 4,51$, $p < .001$, $d = 0,27$, indiquant que les performances aux items congruents sont meilleures qu'aux

items incongruent. Cependant, on observe que la performance des élèves aux items congruents est significativement supérieure à 50%, t(285) = 30,87, $p < .001$, $d = 1,83$, tout comme celle aux items incongruents, t(285) = 15,03, $p < .001$, $d = 0,88$.

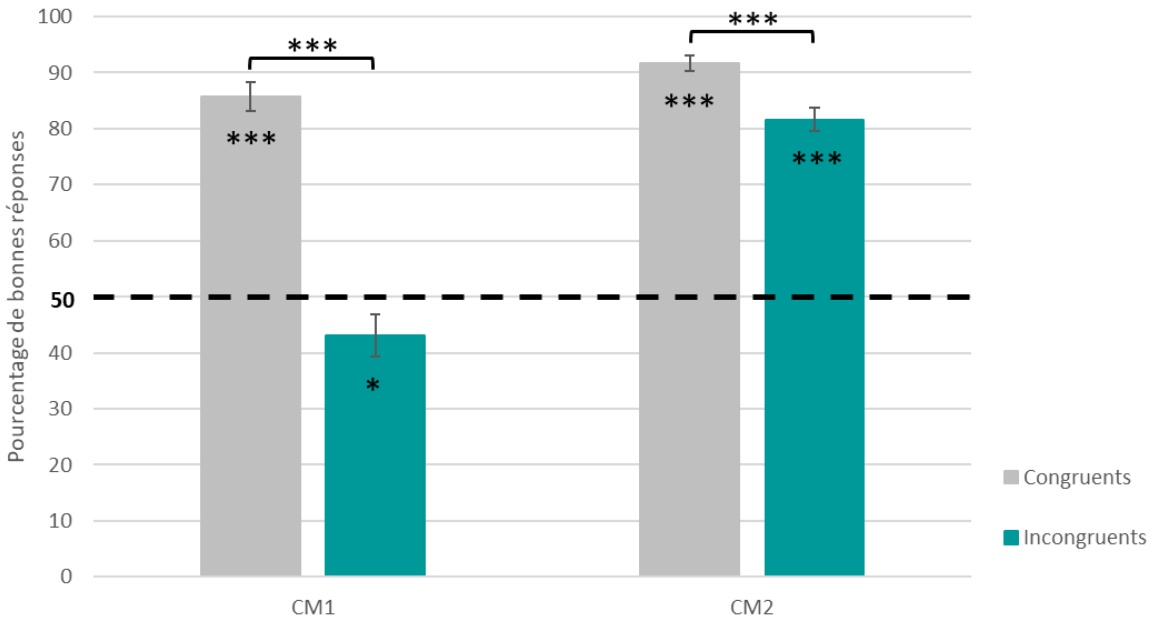


*Figure 20. La moyenne du pourcentage de bonnes réponses à l'exercice du chiffre des unités, en fonction du type d'items pour les élèves de CM1 et CM2. Les barres d'erreurs indiquent l'erreur-type de la moyenne. * p <.05, *** p <.001*

Les problèmes arithmétiques à contenus verbaux

Une 2 (Type d'items : congruent *vs.* incongruent) x 4 (Niveau : CE1 *vs.* CE2 *vs.* CM1 *vs.* CM2) ANOVA sur le nombre de bonnes réponses à l'exercice de résolution de problèmes arithmétiques à contenus verbaux montrait un effet d'interaction entre le type d'items et le niveau, $F(3,610) = 6,63$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .03$ (*cf.* Figure 21). Il y avait un effet principal du type d'items, $F(1,610) = 227,15$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .27$, tels que les items congruents sont mieux réussis que les items incongruents, et un effet principal du niveau, $F(3,610) = 21,71$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .09$.

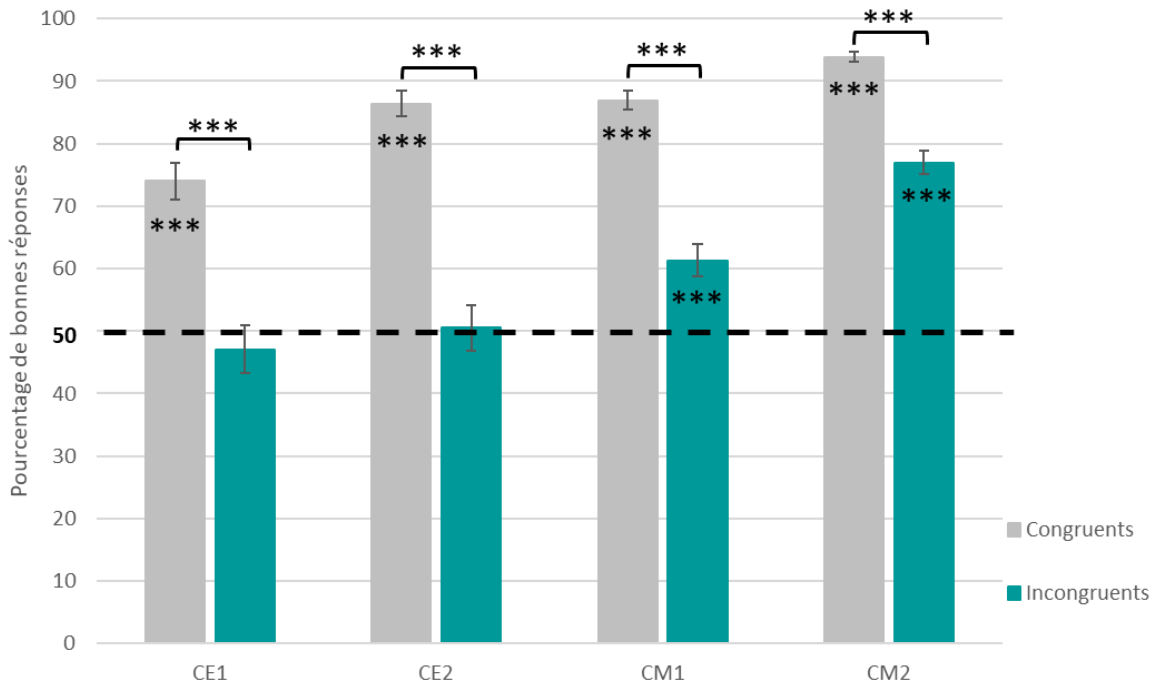


*Figure 21. La moyenne du pourcentage de bonnes réponses à l'exercice des problèmes arithmétiques à contenus verbaux, en fonction du type d'items pour les élèves de CE1, CE2, CM1 et CM2. Les barres d'erreurs indiquent l'erreur-type de la moyenne. *** p <.001*

Pour les élèves de CE1, on observe un effet principal du type d'items, $t(97) = 8{,}55$, $p < .001$, $d = 0{,}86$, telles que les performances aux items congruents sont meilleures qu'aux items incongruents. De plus, on observe que la performance des élèves aux items congruents est significativement supérieure à 50%, $t(97) = 7{,}92$, $p < .001$, $d = 0{,}8$, et la performance des élèves aux items incongruents n'est pas significativement différente de 50%, $t(97) < 1$, $p = .455$.

Pour les élèves de CE2, on observe un effet principal du type d'items, $t(61) = 10{,}18$, $p < .001$, $d = 1{,}29$, telles que les performances aux items congruents sont meilleures qu'aux items incongruents. De plus, on observe que la performance des élèves aux items congruents est significativement supérieure à 50%, $t(61) = 17{,}79$, $p < .001$, $d = 2{,}26$, et la performance des élèves aux items incongruents n'est pas significativement différente de 50%, $t(100) < 1$, $p = .883$.

Pour les élèves de CM1, on observe un effet principal du type d'items, $t(190) = 11{,}12$, $p < .001$, $d = 0{,}8$, telles que les performances aux items congruents sont meilleures qu'aux items incongruents. De plus, on observe que la performance des élèves aux items congruents est significativement supérieure à 50%, $t(190) = 24{,}45$, $p < .001$, $d = 1{,}76$, ainsi que celle aux items incongruents, $t(190) = 4{,}27$, $p < .001$, $d = 0{,}3$.

Pour les élèves de CM2, on observe un effet principal du type d'items, $t(262) = 9{,}79$, $p < .001$, $d = 0{,}6$, telles que les performances aux items congruents sont meilleures qu'aux items incongruents. Cependant, on observe que la performance des élèves aux items congruents est significativement supérieure à 50%, $t(262) = 53{,}65$, $p < .001$, $d = 3{,}3$, ainsi que celle aux items incongruents, $t(262) = 14{,}86$, $p < .001$, $d = 0{,}91$.

Discussion

L'objectif de cette deuxième étude était de mieux connaître les erreurs systématiques commises par les enfants en classe, en les répertoriant et les analysant par le biais des enseignants. Au cours d'une enquête préliminaire, les enseignants de la plateforme numérique et collaborative Lea.fr ont répertorié toutes les erreurs qu'ils observaient en classe, dues à une stratégie automatique qui fonctionne très bien, très souvent, mais pas toujours. Sur cette base, nous avons sélectionné huit de ces heuristiques pour les analyser plus précisément et déterminer à quel âge les élèves étaient les plus sujets à commettre ces erreurs alors même qu'ils connaissaient la règle à suivre pour réussir la tâche, l'algorithme. Il s'agissait donc, pour chacune d'elle de trouver la période sensible, permettant ensuite de proposer une intervention pédagogique adaptée. Ces huit heuristiques portaient sur la comparaison de nombre décimaux, la comparaison de fractions, la multiplication par 10, la soustraction avec retenues, les accords

après les et vous, les accords en nombre, le chiffre des unités et les problèmes arithmétiques à contenus verbaux.

Pour commencer, dans l'exercice de comparaison de nombres décimaux, nous avons montré que comparer des paires de nombres décimaux congruents était plus facile que comparer des paires de nombres décimaux incongruents. Cette observation était consistante avec les études précédentes (Durkin & Rittle-Johnson, 2015; Vamvakoussi & Vosniadou, 2010). De plus, notre étude a permis de montrer que la période la plus adaptée pour travailler sur l'implication du biais du nombre entier et du biais visuo-spatial dans la comparaison de nombres décimaux se trouvait au CM1, car ces derniers ont une réussite inférieure à 50% aux items incongruents, alors que les CM2 sont performants aux items congruents et incongruents. Concernant la comparaison de fractions, le manque de données chez les CM1 ne nous a pas permis d'analyser les compétences des élèves à cet âge. La majeure partie des enseignants de CM1 de cette étude nous ont reporté qu'ils n'avaient pas encore suffisamment abordé les fractions avec leurs élèves pour leur proposer cet exercice. Néanmoins, les données recueillies chez les CM2 allaient dans le même sens que les études précédentes (Meert, Grégoire, & Noël, 2009; Vamvakoussi, Dooren, & Verschaffel, 2012; Van Hoof, Lijnen, Verschaffel, & Van Dooren, 2013) et ont montré une meilleure performance des élèves aux items congruents qu'aux items incongruents. De plus, nous observons que les items congruents sont largement réussis, alors que la performance aux items incongruents ne dépasse pas les 50% de réussite. Le CM2 semble donc être la période idéale pour proposer une intervention pédagogique autour de la comparaison de fractions. L'exercice portant sur la multiplication par 10 a permis de montrer que les CM1 et les CM2 réussissaient mieux les items congruents que les items incongruents. De plus, les analyses ont permis de montrer que ces deux classes d'âge étaient idéales pour proposer une intervention pédagogique car les élèves échouent à plus de 50% aux items congruents, mais pour autant réussissent les items congruents. En ce qui concerne la soustraction avec retenue,

on observe tout d'abord que chez les CE2, CM1 et CM2, les élèves réussissent mieux les items verticaux que les items horizontaux. Ce résultat est en accord avec ceux de la littérature (Trbovich & Fevre, 2003). De plus, on observe qu'à chaque niveau, les élèves réussissent mieux les items congruents que les items incongruents. Cela est également en adéquation avec les travaux précédents (Caviola, Mammarella, Pastore, & LeFevre, 2018). En outre, pour les items présentés horizontalement, on observe que les élèves n'arrivent pas à inhiber leur heuristique, même en CM2, alors que les élèves ne tombent plus dans le piège de l'heuristique dès le CM1 lorsque les items sont présentés verticalement. Les niveaux du CE1 et du CE2 semblent donc les niveaux idéaux pour proposer une intervention pédagogique basée sur l'heuristique « soustraire le plus petit chiffre au plus grand » car ils ne réussissent pas à l'inhiber, alors qu'ils réussissent les items congruents. L'exercice sur les accords après les et vous a montré que les items congruents étaient mieux réussis que les items incongruents, et ceux du CE2 au CM2. Ce résultat est en accord avec les travaux précédents (Fayol, Hupet, & Largy, 1999). Nos analyses montrent que seuls les élèves de CM2 sont dans la période sensible permettant de proposer une intervention pédagogique sur l'heuristique. En effet, les élèves de CE2 et de CM1 ne semblent pas encore maîtriser l'algorithme de conjugaison leur permettant de réussir l'exercice, même quand ce dernier ne comporte pas de piège (*i.e.* ils n'atteignent pas les 50% de réussite aux items congruents). Concernant les accords en nombre, on observe que les CM1 et les CM2 sont meilleurs pour répondre aux items congruents singuliers qu'aux items incongruents. De plus, on observe que les élèves de CM1 et CM2 sont performants pour répondre aux items congruents et incongruents. Ces derniers ne semblent donc pas dans la période sensible propice à une intervention pédagogique basée sur cette heuristique. De ce fait, il serait intéressant d'interroger des élèves de CE2 sur cet exercice pour connaître leurs pourcentages de bonnes réponses aux items congruents et incongruents. Enfin, dans cet exercice, les items congruents pluriels semblaient plus compliqués pour les élèves que les deux autres types d'items. Etant donné que

nous avons intégré des items congruents singuliers et pluriels, mais uniquement des items incongruents singuliers, il pourrait être intéressant de mesurer les performances des élèves de CM2, qui réussissent les items congruents pluriels à plus de 50%, à des items incongruents pluriels (*e.g.* les ampoules de la voiture s'allument). Si les élèves échouent à ces items incongruents pluriels, il serait intéressant de leur proposer une intervention pédagogique ciblée sur cette erreur. L'exercice de chiffre des unités montrait que les élèves de CM1 et CM2 réussissaient mieux les items congruents que les items incongruents. Pour les deux niveaux les items congruents sont très bien réussis. En revanche, il semble difficile pour les élèves de CM1 d'inhiber la règle surapprise « le dernier chiffre d'un nombre est le chiffre des unités ». Ces derniers semblent donc se trouver dans la période sensible pour recevoir une intervention pédagogique. Pour finir, les items congruents de résolution de problèmes arithmétiques à contenus verbaux étaient mieux réussis que les items incongruents pour les élèves du CE1 au CM2. Ce résultat était en adéquation avec la littérature actuelle (Riley & Greeno, 1988; Schumacher & Fuchs, 2012). En revanche, on observe que si les items congruents étaient réussis à tous ces niveaux, la performance aux items incongruents dépassait les 50% de réussite uniquement chez les CM1 et CM2. Ainsi, les CE1 et CE2 sembleraient être en difficulté pour inhiber l'heuristique « additionner si plus, soustraire si moins ». Ils se situaient donc dans la période sensible pour recevoir une intervention pédagogique.

Par le biais de l'enquête préliminaire, nous avons pu montrer que les enseignants étaient à même de reconnaître une heuristique dans leur classe. De plus, les différents exercices présentés dans cette étude confortent l'idée que l'apprentissage d'une notion ne reposait pas uniquement sur l'acquisition de connaissances théoriques, mais aussi sur la capacité à inhiber une stratégie antérieure lorsque cette dernière nous induit en erreur (Houdé, 2019b). Ainsi, pour aider les élèves à surmonter ces erreurs, proposer une intervention pédagogique basée sur l'algorithme ne semble pas suffisant. En effet, une intervention pédagogique reposant sur

l'inhibition de l'heuristique en question semblerait plus appropriée. Il serait donc intéressant de se baser sur les périodes sensibles que cette étude a pu mettre en lumière pour proposer aux élèves des interventions exécutives mettant en avant l'heuristique à inhiber et rappelant l'algorithme à utiliser pour réussir la tâche. Des études précédentes dans le domaine du raisonnement logique ont montré que cette forme d'entrainement exécutif était plus efficace qu'un simple rappel de la règle (Cassotti & Moutier, 2010; Moutier et al., 2002; Moutier & Houdé, 2003; Rossi et al., 2015). Ainsi, les études 3 et 4 auront pour objectif de déterminer si cette intervention exécutive est adaptable à des tâches scolaires pour aider les élèves à surmonter leurs erreurs systématiques.

Étude 3

Apprendre à inhiber une heuristique trompeuse pour surmonter les difficultés dans la résolution de problèmes arithmétiques à contenus verbaux : Convergence de résultats obtenus au laboratoire et en recherche participative

Létang, M., Citron, P., Garbarg-Chenon, J., Houdé, O., & Borst, G. (en révision). Learning to inhibit a misleading strategy to overcome difficulties with arithmetic word problems in the classroom: Converging evidence from a laboratory and citizen research studies. *Learning and Instructions.*

Résumé

Résoudre des problèmes arithmétiques à contenus verbaux comme « Lucie a 10 crayons. Elle a 5 crayons de plus que Léo. Combien de crayons a Paul ? », peut être difficile pour des élèves d'âge scolaire, en partie à cause de leur besoin d'inhiber l'heuristique trompeuse « additionner si plus, soustraire si moins » (Lubin et al., 2013). Cette étude examine dans deux expérimentations si enseigner à des enfants d'âge scolaire à inhiber l'heuristique trompeuse « additionner si plus, soustraire si moins » (intervention exécutive) est plus efficace que leur enseigner l'algorithme à utiliser (intervention contrôle). Les interventions étaient menées par un chercheur en individuel (Expérimentation 1) et par les enseignants en groupe (Expérimentation 2). Les deux expérimentations convergeaient pour montrer qu'apprendre à inhiber une heuristique est plus efficace qu'un simple apprentissage de l'algorithme pour aider les enfants à surmonter leurs erreurs systématiques dans la résolution de problèmes arithmétiques immédiatement et cinq jours après l'intervention pédagogique.

Mots-clés : Problèmes arithmétiques à contenus verbaux, Contrôle inhibiteur, Entraînement spécifique, Recherche participative

Introduction

L'étude PISA révèle que la résolution d'un large éventail de problèmes en mathématiques reste un défi pour un grand nombre d'élèves à 15 ans (OCDE, 2019). C'est également ce que nous avons observé dans notre étude 2, où nous avons montré que la résolution de problèmes arithmétiques à contenus verbaux était difficile pour les élèves du CE1 au CM2. Cette difficulté présente chez les enfants d'âge scolaire se retrouve également chez les adultes dans la résolution des problèmes arithmétiques simples tel que « Léa a 10 crayons. Elle a 5 crayons de plus que Tom. Combien de crayons a Tom ? » (Verschaffel, 1994). Les problèmes de comparaison, comme celui-ci, sont difficiles à résoudre du fait de la complexité des schémas à construire (Riley, Greeno, & Heller, 1983) et de l'utilisation de terminologies relationnelles comme « plus que » ou « moins que » (Schumacher & Fuchs, 2012). Comme de nombreux problèmes arithmétiques à contenus verbaux, ces problèmes de comparaison nécessitent le calcul d'opérations arithmétiques de base (*e.g.* l'addition et la soustraction). Cependant, la terminologie relationnelle utilisée dans ces derniers peut être plus difficile à comprendre et à traiter que les autres (Fan, Mueller, & Marini, 1994) et c'est ce qui expliquerait pourquoi ils sont plus difficiles à résoudre (Riley & Greeno, 1988; Verschaffel et al., 1992).

Dans cette troisième étude, nous nous intéressons plus particulièrement aux problèmes arithmétiques à contenus verbaux où le référent est inconnu (*e.g.* Louise a 10 billes. Elle a 5 billes de plus que Jérémy ? Combien de billes a Jérémy ?) (Riley et al., 1983). Les participants commettent plus d'erreurs dans ce type de problèmes que dans les problèmes où le comparé est inconnu (*e.g.* Louise a 10 billes. Jérémy a 5 billes de plus que Louise. Combien de billes a Jérémy ?) (Riley & Greeno, 1988; Schumacher & Fuchs, 2012; Verschaffel, 1994). Ces résultats sont en accord avec les observations faites dans l'étude 2 de cette thèse. Les problèmes où le référent est inconnu seraient plus difficiles à résoudre que les problèmes où le comparé

est inconnu car le terme relationnel (*e.g.* « plus que ») est incongruent avec l'opération arithmétique à réaliser (*i.e.* soustraction) pour résoudre le problème (Lewis & Mayer, 1987). Ces derniers sont cognitivement plus coûteux car ils requièrent le réarrangement du statut relationnel pour résoudre le problème. Par exemple, dans le problème présenté précédemment, « Léa a 10 crayons. Elle a 5 crayons de plus que Tom. Combien de crayons a Tom ? », les élèves doivent comprendre la relation symétrique entre « plus » et « moins » pour comprendre que « Tom a 5 crayons de moins que Léa ». Réorganiser la phrase permet de rendre plus facile l'identification de l'opération arithmétique à réaliser (*i.e.* soustraction) car le terme relationnel (*i.e.* « moins que ») est désormais congruent avec l'opération arithmétique à réaliser.

Lorsqu'on demande à des enfants de résoudre des problèmes arithmétiques dont le référent est inconnu, ces derniers commettent des erreurs d'inversion. Ces erreurs sont caractérisées par le fait d'additionner des nombres au lieu de les soustraire, et vice versa (Lewis & Mayer, 1987; Stern, 1993; Verschaffel et al., 1992). Les erreurs d'inversion des enfants de 5 – 7 ans pourraient être dues à leur incapacité à comprendre la relation symétrique et l'interchangeabilité des termes relationnels utilisés dans les problèmes dont le référent est inconnu (Stern, 1993). Cependant, ces problèmes restent difficiles à résoudre pour les enfants de 10 – 11 ans, alors même qu'ils comprennent l'interchangeabilité de ces deux termes relationnels (Verschaffel, 1994).

Récemment, deux études ont montré que la difficulté à résoudre les problèmes arithmétiques dans lesquels le terme relationnel (*e.g.* « plus que ») est incongruent avec l'opération arithmétique à utiliser (*i.e.* une soustraction), serait en partie due à une difficulté à inhiber une stratégie arithmétique surapprise, mais pourtant trompeuse, chez les enfants, les adolescents, les adultes et les experts en mathématiques (Lubin et al., 2016, 2013). Très souvent, parfois excessivement, nous nous fions à nos expériences de la vie quotidienne pour réussir la résolution de problèmes arithmétiques à contenus verbaux (Thevenot, 2017). Quand on résout

un problème avec un référent inconnu, il faut généralement inhiber la stratégie trompeuse, l'heuristique « additionner si plus, soustraire si moins », qui a été renforcée au cours des années scolaires précédentes, pour éviter les erreurs d'inversion. Cependant, il est important de soulever que cette stratégie permet aux enfants de réussir une grande partie des problèmes arithmétiques, et notamment les problèmes dont le comparé est inconnu, dans lesquels le terme relationnel est congruent avec l'opération arithmétique à faire. Par conséquent, ces deux études précédentes suggèrent que l'amélioration de la compétence à résoudre des problèmes arithmétiques ayant des référents inconnus de l'enfance à l'âge adulte (Lewis & Mayer, 1987; Verschaffel, 1994) ne serait pas seulement due à l'habilité à comprendre l'interchangeabilité des termes relationnels, mais aussi à la compétence progressive d'inhiber la stratégie trompeuse « addition si plus, soustraire si moins » (Lubin et al., 2016, 2013).

Dans cette étude 3, nous souhaitons donc observer si une intervention pédagogique basée sur l'apprentissage à identifier et résoudre le conflit entre le terme relationnel et l'opération arithmétique à utiliser en inhibant l'heuristique « additionner si plus, soustraire si moins » peut aider les élèves de 7 à 10 ans à surmonter leurs erreurs d'inversion lorsqu'ils résolvent des problèmes arithmétiques dont le référent est inconnu. Cette intervention pédagogique est un entrainement « tâche spécifique » qui se base sur des interventions exécutives précédemment présentées dans l'introduction de ce manuscrit. Ces dernières ont montré leur efficacité pour surmonter des biais de raisonnement dans divers problèmes logiques (Cassotti & Moutier, 2010; Houdé & Moutier, 1996; Moutier et al., 2002; Rossi et al., 2015). Cette intervention exécutive repose sur l'entrainement à inhiber une stratégie trompeuse (*i.e.* une heuristique) pour pouvoir activer une stratégie appropriée (*i.e.* un algorithme). L'intervention inclut des alertes exécutives verbales et visuo-spatiales pour apprendre aux participants comment inhiber l'heuristique, mais aussi une explication de l'algorithme à utiliser pour résoudre le problème donné. Dans chacune de ces précédentes études, l'effet de

l'intervention était évalué en comparant le changement de performance sur un problème logique proposé avant (pré-test) et après (post-test) l'intervention exécutive, au changement de performances avant et après une intervention contrôle actif. Cette intervention contrôle ne comportait aucune alerte exécutive et consistait à rappeler la stratégie logique appropriée permettant de résoudre le problème.

Dans cette étude 3, nous avons mené deux expérimentations pour mesurer l'efficacité d'une intervention exécutive similaire aux précédentes sur la correction des erreurs d'inversion dans la résolution de problèmes arithmétiques à contenus verbaux. Dans chacune de ses expérimentations, on demandait à des enfants de 7 à 10 ans de résoudre des problèmes avec référent inconnu (ci-après appelé problèmes incongruents) et des problèmes avec comparé inconnu (ci-après appelé problèmes congruents) en pré-test. Les enfants étaient ensuite assignés à l'une des deux interventions : l'intervention exécutive ou l'intervention contrôle. Immédiatement après (*i.e.* le post-test immédiat) et cinq jours après (*i.e.* le post-test différé) l'intervention, les enfants devaient de nouveau résoudre des problèmes arithmétiques à contenus verbaux congruents et incongruents. Nous avons mené ces deux expérimentations chez des élèves de 7 à 10 ans pour différentes raisons. La première est que la compréhension de l'interchangeabilité des termes relationnels débute à 7 ans (Stern, 1993), bien que la difficulté à inhiber l'heuristique « additionner si plus, soustraire si moins » persiste jusqu'à 12 ans (Lubin et al., 2016, 2013). La seconde est que l'étude 2 de cette thèse a permis de mettre en lumière que les élèves de CE1 et de CE2 étaient dans la période sensible pour bénéficier d'une intervention pédagogique ciblée sur l'heuristique « additionner si plus, soustraire si moins ». Dans la première expérimentation, la collection de données aux trois évaluations et les interventions pédagogiques s'effectuaient à l'école par un expérimentateur du laboratoire. La seconde expérimentation quant à elle était une recherche participative dans laquelle la collecte des données et les interventions étaient menées par l'enseignant dans sa classe. De plus, les

interventions dans l'expérimentation 1 se faisaient individuellement, en dehors de la classe, alors qu'elles se faisaient dans la classe, par l'enseignant et en groupe dans l'expérimentation 2, pour tester la validité écologique de l'intervention.

Dans chaque expérimentation, nous avons fait l'hypothèse que si les erreurs d'inversion dans la résolution de problèmes arithmétiques à contenus verbaux étaient en partie dues à un défaut d'inhibition de l'heuristique « additionner si plus, soustraire si moins », la capacité des enfants à résoudre des problèmes arithmétiques à contenus verbaux incongruents augmenterait plus après une intervention ciblée autour de l'apprentissage à inhiber une heuristique trompeuse et à activer l'algorithme approprié (*i.e.* l'intervention exécutive), plutôt qu'après une intervention se limitant à apprendre à utiliser l'algorithme approprié (*i.e.* l'intervention contrôle). De plus, nous n'espérions aucun effet de l'intervention exécutive sur les performances des enfants aux problèmes congruents étant donné que ces derniers ne requièrent pas l'inhibition de l'heuristique « additionner si plus, soustraire si moins ». Enfin, si les enfants renforcent leur capacité à inhiber leur heuristique trompeuse, alors cette amélioration des compétences dans la résolution de problèmes arithmétiques à contenus verbaux incongruents devrait se maintenir cinq jours après l'intervention. Ainsi, on devrait observer une meilleure performance sur le post-test différé que sur le pré-test pour les élèves ayant reçu l'intervention exécutive.

Expérimentation 1

Méthode

Participants

La taille d'échantillon a été déterminée par une analyse de puissance *a priori* utilisant G*Power 3.1.9.2 (Faul, Erdfelder, Buchner, & Lang, 2009). Elle a révélé qu'un minimum de 28 enfants par groupe était nécessaire pour détecter une taille d'effet moyen de 0,25 (selon la convention de taille d'effet de Cohen) avec une 3 (Temps : pré-test *vs.* post-test immédiat *vs.* post-test différé) x 2 (Problème arithmétique : congruent *vs.* incongruent) x 2 (Groupe d'intervention : contrôle ou expérimental) analyses de la variance (ANOVA) à mesures répétées avec une puissance (1 - β) fixée à .80 et un α fixé à .05. Nous avons recruté 80 enfants de 7 à 10 ans. Un total de 9 enfants a été retiré de l'étude car ils avaient manqué une ou plusieurs sessions de collecte des données (*i.e.* pré-test, post-test immédiat ou différé). L'échantillon final était donc composé de 71 enfants. Chaque enfant était réparti aléatoirement dans l'un des deux groupes : le groupe d'intervention exécutive (N = 39, M = 8 ± 0,6 ans, 15 filles) ou le groupe d'intervention contrôle (N = 32, M = 8 ± 0,7 ans, 15 filles). L'expérimentation a été menée en accord avec les normes nationales et internationales qui régissent la participation d'humains à la recherche. La participation des enfants se faisait sur le volontariat, après l'obtention d'un consentement éclairé des responsables légaux des enfants.

Matériel

<u>Evaluations : pré-test, post-test immédiat et post-test différé</u>

La performance des élèves en résolution de problèmes arithmétiques à contenus verbaux a été mesurée par le biais d'une tâche papier-crayon. A chaque évaluation, les enfants devaient

résoudre 10 problèmes incongruents dans lesquels le terme relationnel (*e.g.* « plus que ») était incongruent avec l'opération arithmétique à utiliser (*i.e.* une soustraction) et 10 problèmes congruents où le terme relationnel (*e.g.* « moins que ») était congruent avec l'opération arithmétique à utiliser (*i.e.* une soustraction). La moitié des problèmes incongruents et congruents contenait le terme relationnel « plus que » et l'autre moitié contenait le terme « moins que ». Pour chaque problème, les enfants devaient écrire l'opération et son résultat. Pour chaque type de problèmes, nous récoltions le nombre de bonnes réponses.

L'intervention exécutive

L'intervention exécutive durait 15 minutes et était réalisée en individuel (*cf.* Annexe 12). Son but était d'apprendre aux enfants à inhiber leur heuristique surapprise « additionner si plus, soustraire si moins » lorsque cela était nécessaire. L'intervention comportait des alertes exécutives verbales et visuo-spatiales pour apprendre aux élèves à inhiber leur stratégie trompeuse, tel que « Attention ! Dans certains cas il est difficile de trouver quelle est l'opération à réaliser. Par exemple, dans l'énoncé « Pierre a 5 billes. Il a 3 billes de plus que Luc. Combien de billes a Luc ? », certains enfants pensent qu'il faut faire une addition car ils entendent le mot « plus » dans le problème. Ils se trompent car ils ont l'habitude de faire une addition quand ils entendent « plus » et de faire une soustraction quand ils entendent « moins ». Cette habitude peut nous influencer dangereusement. On croit que ça nous aide, alors qu'en réalité on tombe dans un piège ». L'intervention proposait également une explication de la stratégie appropriée pour réussir la tâche, telle que « Pour déterminer quelle opération choisir, il faut bien faire attention aux mots utilisés et se représenter la situation dans sa tête et essayer de réorganiser le problème pour déterminer qui a le plus de billes et qui en a le moins ». Ensuite, on disait aux enfants « Dans ce problème, la source de l'erreur vient de l'habitude que l'on a de faire une addition dès qu'on entend le mot « plus » et une soustraction dès qu'on entend le mot « moins ».

Rappelle-toi, dans certains cas, cela nous fait tomber dans un piège. Pour ne pas tomber dans le piège, il faut donc visualiser le problème, comprendre qui a le plus de billes, réorganiser le problème et choisir la bonne opération ». De plus, l'intervention exécutive était associée à la manipulation active d'un attrape-piège, une planche transparente hachurée représentant le CI à exercer contre l'heuristique, ainsi qu'un cercle central ajouré (*i.e.* sans hachure) représentant la réponse algorithmique. Pour chaque énoncé, les élèves disposaient de deux cartons : un carton représentant la bonne réponse, celle apportée par l'algorithme, et un carton représentant la mauvaise réponse, celle apportée par l'heuristique. Les enfants étaient donc invités à expliquer pourquoi la réponse apportée par la stratégie trompeuse « addition si plus et soustraire si moins » était incorrecte et à placer la carte-réponse correspondante sous les hachures de la planche transparente. Les enfants étaient ensuite incités à choisir la carte correspondant à la bonne réponse et à la placer sur le rond central de l'attrape-piège. Cette partie de l'intervention était répétée avec quatre problèmes incongruents.

L'intervention contrôle active

Comme dans l'intervention exécutive, l'intervention contrôle durait 15 minutes et était réalisée individuellement (*cf.* Annexe 13). L'intervention ne comportait aucune alerte exécutive et était ciblée autour de l'explication de la stratégie appropriée sur laquelle s'appuyer pour résoudre le problème. On disait aux enfants « Pour trouver la bonne opération, il ne faut pas hésiter à se faire « le film » du problème dans sa tête, à visualiser la situation et donc à réorganiser le problème pour savoir qui a le plus de billes ». Pour standardiser le plus possible les deux interventions, les enfants manipulaient un leurre d'attrape-piège, une boîte à réponses. Cet outil était constitué d'une planche transparente avec une ligne horizontale en son centre. Les enfants devaient alors placer la bonne réponse au-dessus de cette ligne, et la mauvaise réponse en dessous de celle-ci. Cette partie de l'intervention était répétée avec quatre problèmes incongruents.

Procédure

Les enfants étaient testés collectivement pour le pré-test, trois jours avant l'intervention pédagogique. Ils étaient ensuite assignés aléatoirement à un des deux groupes d'intervention. Chaque enfant recevait en individuel l'une des deux interventions menée par l'expérimentateur, dans une pièce calme à côté de la classe de l'enfant. Le post-test immédiat était effectué individuellement juste après l'intervention pédagogique, et le post-test différé était réalisé cinq jours après l'intervention en groupe classe (*cf.* Figure 21).

Résultats

Pour chaque enfant, nous avons calculé séparément le nombre de bonnes réponses des élèves pour les problèmes incongruents et congruents, et ce, pour les trois évaluations. Les participants outliers ont été exclus sur la base des résidus du modèle linéaire pour les problèmes congruents et incongruents au pré-test, post-test immédiat et post-test différé. De plus, les données différant de 3 MAD (*i.e.* écart médian absolu) de la médiane du résidu ont été exclues. Enfin, cinq enfants ont été exclus des analyses car ils avaient des données manquantes à une ou plusieurs des évaluations.

Une 3 (Temps : pré-test *vs* post-test immédiat *vs* post-test différé) x 2 (Problème arithmétique à contenus verbaux : congruent *vs* incongruent) x 2 (Groupe d'intervention : exécutive *vs* contrôle) analyse de la variance à mesures répétées (ANOVA) sur le nombre de bonnes réponses en résolution de problèmes arithmétiques à contenus verbaux montrait un effet d'interaction entre le temps, le problème arithmétique à contenus verbaux et le groupe, $F(2, 128) = 3.9$, $p = .03$, $\eta^2p = .05$ (*cf.* Tableau 6). Il y avait un effet principal du problème arithmétique à contenus verbaux, $F(1,64) = 47,88$, $p < .001$, $\eta^2_p = .43$, avec de meilleures

performances aux problèmes congruents qu'incongruents, mais pas d'effet principal du temps, $F(2,128) < 1$, ou du groupe d'intervention pédagogique, $F(1,64) = 1{,}02$, $p = .32$.

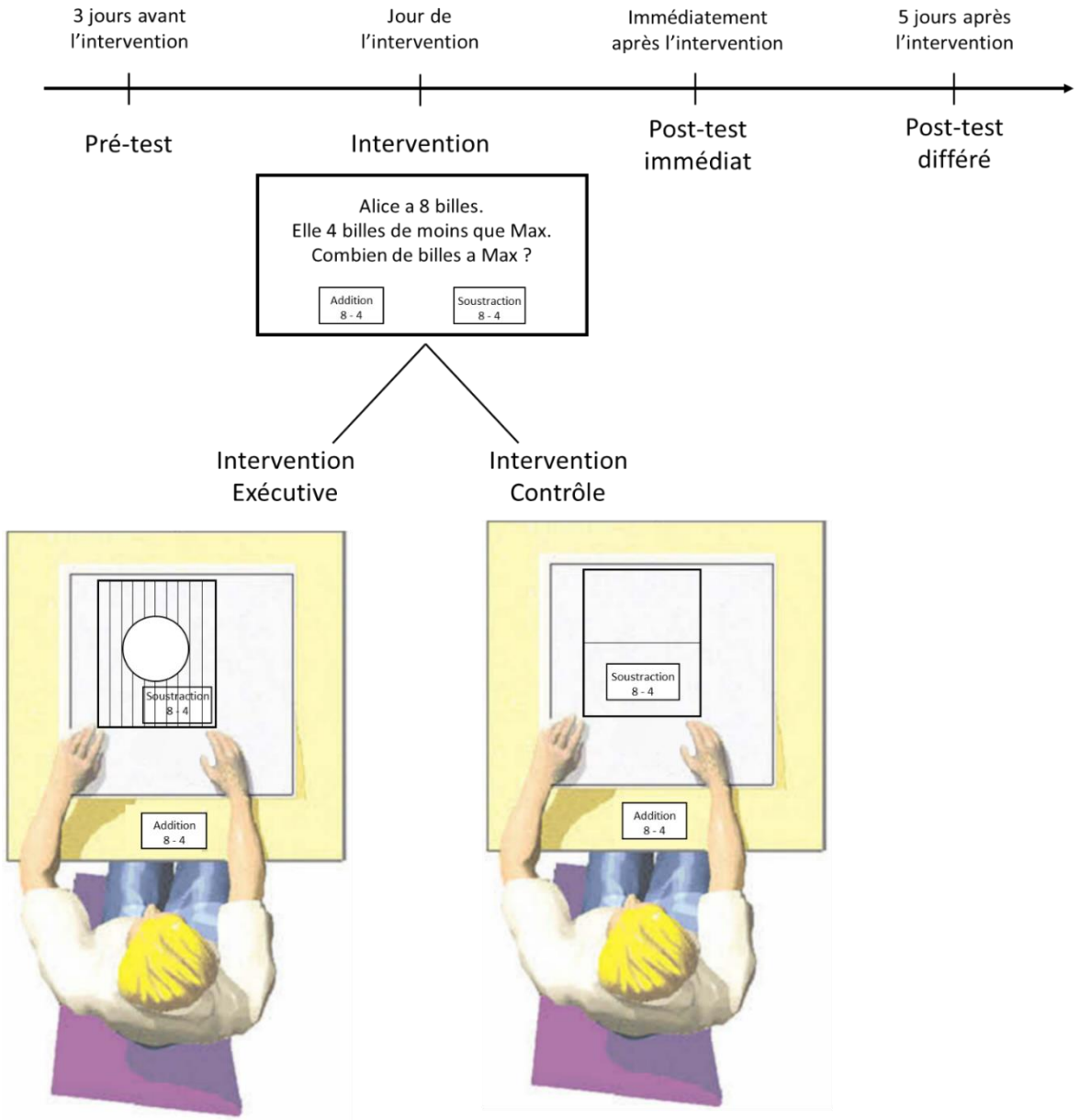


Figure 21. La procédure expérimentale utilisée dans les deux groupes d'intervention, avec un exemple de manipulation de problèmes incongruents utilisé par les élèves en fonction de leur groupe.

Tableau 6. Le nombre de bonnes réponses des élèves aux trois évaluations aux problèmes arithmétiques à contenus verbaux congruents et incongruents, en fonction du groupe d'intervention pédagogique. Les écart-types sont entre parenthèses.

	Problèmes congruents		Problèmes incongruents	
	Intervention contrôle	Intervention exécutive	Intervention contrôle	Intervention exécutive
Pré-test	8.68 (1.9)	8.94 (1.6)	5.39 (3.8)	5.6 (3.7)
Post-test immédiat	8.97 (1.6)	8.34 (2.4)	4.94 (4)	6.77 (3.4)
Post-test différé	8.71 (2.1)	8.51 (2.4)	4.9 (4.1)	6.31 (3.2)

Une 3 (Temps : pré-test *vs* post-test immédiat *vs* post-test différé) x 2 (Groupe d'intervention pédagogique : exécutive *vs* contrôle) ANOVA à mesures répétées sur le nombre de bonnes réponses aux problèmes arithmétiques à contenus verbaux incongruents a montré un effet d'interaction entre le temps et le groupe d'intervention, $F(2, 128) = 3{,}22$, $p = .04$, $\eta^2_p = .05$. Il n'y avait pas d'effet principal du temps, $F(2,128) < 1$, ou du groupe d'intervention pédagogique, $F(1,64) = 1{,}97$, $p = .16$. De plus, les enfants étaient plus performants pour résoudre les problèmes incongruents au post-test immédiat après avoir suivis l'intervention exécutive, plutôt qu'au pré-test, $t(34) = 2{,}82$, $p = .004$, $d = 0{,}47$. Dans l'intervention contrôle, on observe que les enfants réussissent aussi bien les items incongruents au pré-test qu'au post-test immédiat, $t(30) < 1$. Par ailleurs, au post-test immédiat, les enfants du groupe d'intervention exécutive étaient plus performants pour résoudre les problèmes arithmétiques à contenus verbaux incongruents, que les élèves ayant suivi l'intervention contrôle, $t(64) = 2{,}03$, $p = .02$, $d = 0{,}50$. Nous avons également observé une différence marginale entre les deux groupes au post-test différé $t(64) = 1{,}57$, $p = .06$, mais aucune en pré-test, $t(64) < 1$ (*cf.*, Figure 22).

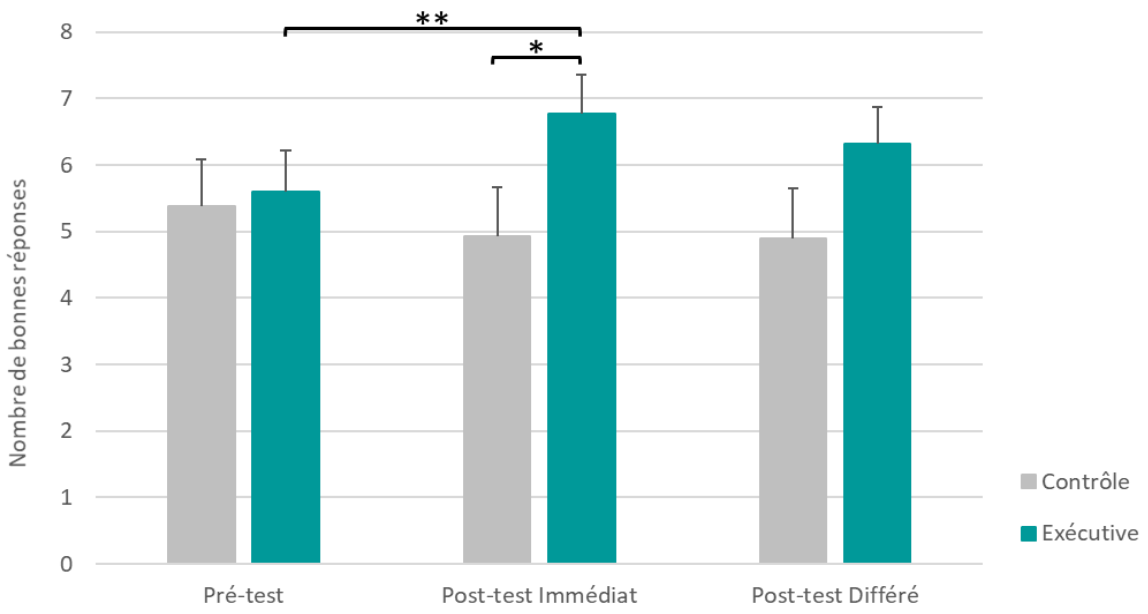


*Figure 22. Le nombre de bonnes réponses aux problèmes incongruents aux trois évaluations en fonction du groupe d'intervention pédagogique. Les barres d'erreurs représentent l'erreur-type de la moyenne. * p < .05, ** p < .01.*

Une 3 (Temps : pré-test *vs* post-test immédiat *vs* post-test différé) x 2 (Groupe d'intervention : exécutive *vs* contrôle) ANOVA à mesures répétées sur le nombre de bonnes réponses aux problèmes arithmétiques à contenus verbaux congruents n'a pas permis de montrer un effet d'interaction significatif entre le temps et le groupe d'intervention, $F(2, 128) = 1{,}61$, $p = .2$ (*cf.* Figure 23). Il n'y avait pas non plus d'effet principal du temps $F(2,128) < 1$, ou du groupe d'intervention pédagogique, $F(1,64) < 1$.

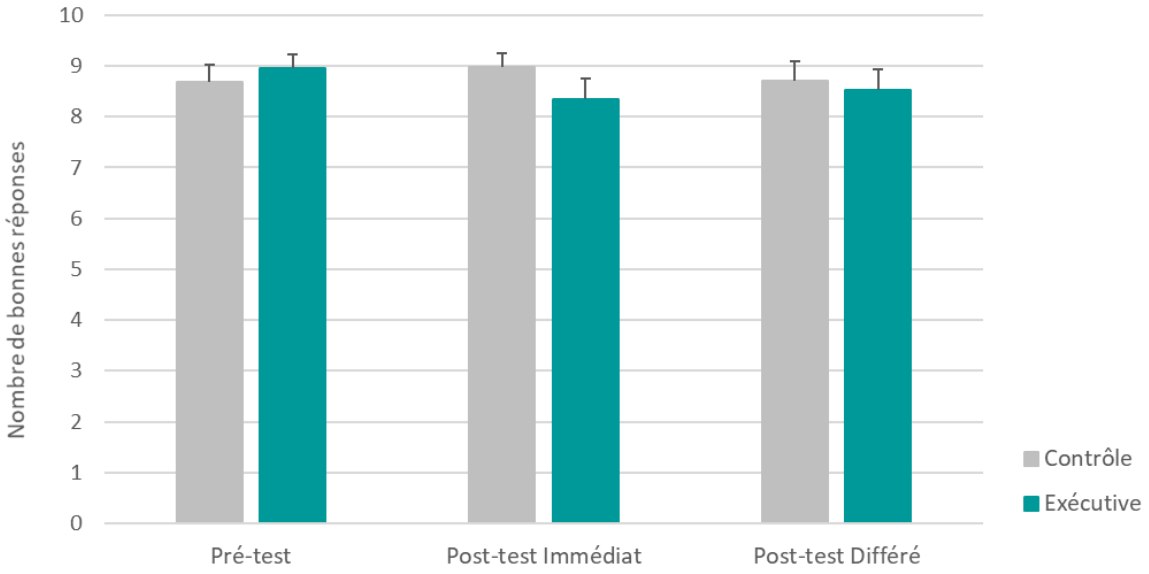


Figure 23. Le nombre de bonnes réponses aux problèmes congruents aux trois évaluations en fonction du groupe d'intervention pédagogique. Les barres d'erreurs représentent l'erreur-type de la moyenne.

Discussion

En accord avec les études précédentes (Riley & Greeno, 1988; Schumacher & Fuchs, 2012; Verschaffel, 1994) et notre deuxième étude, nous avons trouvé que les enfants de 7 à 10 ans réussissaient mieux la résolution de problèmes arithmétiques à contenus verbaux où le terme relationnel (*e.g.* « plus que ») est congruent avec l'opération arithmétique à choisir (*i.e.* addition) plutôt que les problèmes arithmétiques où le terme relationnel (*e.g.* « plus que ») est incongruent avec l'opération arithmétique à faire (*i.e.* soustraction). La difficulté dans la résolution de problèmes incongruents pour les élèves d'âge scolaire est en partie causée par la difficulté à inhiber l'heuristique « additionner si plus, soustraire si moins », renforcée au cours des années scolaires précédentes, qui devient trompeuse lorsque le terme relationnel est incongruent avec l'opération arithmétique à réaliser (Lubin et al., 2016, 2013). Dans cette première expérimentation, nous avons montré qu'enseigner aux enfants comment inhiber la stratégie trompeuse « additionner si plus, soustraire si moins » dans le contexte d'items incongruents était une façon efficace d'améliorer la compétence des élèves de 7 – 10 ans à

résoudre ces problèmes, et ce juste après l'intervention. L'effet de l'intervention semble de courte durée car nous n'avons trouvé qu'une différence marginale entre les deux interventions au post-test différé, cinq jours après l'intervention. De plus, on constate qu'apprendre à inhiber la stratégie trompeuse « additionner si plus, soustraire si moins » dans le contexte des items incongruents n'a pas affecté la compétence des enfants à résoudre les problèmes congruents où l'heuristique permet de réussir.

Une importante limitation dans cette première expérimentation était que l'intervention pédagogique soit conduite en individuelle avec l'intervention d'un expérimentateur. Pour affirmer que notre intervention pédagogique peut aider les élèves à surmonter leurs difficultés dans la résolution de problèmes arithmétiques à contenus verbaux à l'école, nous devons prouver que ces premiers résultats peuvent être répliqués lorsque l'enseignant mène l'intervention dans sa classe, avec un groupe d'élèves. C'est l'objectif de la seconde expérimentation.

Expérimentation 2

L'expérimentation 2 a pour but de répliquer les découvertes de l'expérimentation 1 où l'enseignant est en charge de l'intervention pédagogique dans sa propre classe. Pour cela, nous avons conçu l'expérimentation 2 comme un projet de recherche participative où les enseignants étaient responsables de la récolte des données sur les trois évaluations, ainsi que de la répartition aléatoire des élèves au sein des deux groupes. Comme nous avons pu le voir en introduction de cette thèse, la science participative présente un intérêt particulier en éducation car il permet non seulement de combler le fossé entre les chercheurs et les non-chercheurs, mais aussi de contribuer à l'amélioration de la culture scientifique des non-chercheurs (Bonney et al., 2015). La participation des enseignants était sur la base du volontariat et ces deniers étaient en contact

avec les chercheurs à chaque étape du projet via la plateforme numérique et collaborative Lea.fr. Dans chaque classe, l'enseignant répartissaient aléatoirement la moitié de ses élèves dans le groupe d'intervention exécutive et l'autre moitié dans le groupe d'intervention contrôle active. Cette division au sein de chaque classe permettait de contrôler l'effet maître (Nye et al., 2004).

Méthode

Participants

La taille d'échantillon a été déterminée par une analyse de puissance *a priori* utilisant G*Power 3.1.9.2 (Faul et al., 2009). Elle a révélé qu'un minimum de 44 enfants par groupe était nécessaire pour détecter une petite taille d'effet de 0,20, basée sur la taille d'effet de l'expérimentation 1 avec une 3 (Temps : pré-test *vs.* post-test immédiat *vs.* post-test différé) x 2 (Problème arithmétique : congruent *vs.* incongruent) x 2 (Groupe d'intervention : contrôle ou expérimental) analyses de la variance (ANOVA) à mesures répétées avec une puissance (1 - β) fixée à .80 et un α fixé à .05. Nous avons recruté 182 enfants de 7 à 10 ans. Un total de 20 enfants a été retiré de l'étude car ils avaient manqué une ou plusieurs sessions de collecte des données (pré-test, post-test immédiat ou différé). L'échantillon final était donc composé de 162 enfants. Chaque enfant était réparti aléatoirement dans l'un des deux groupes : groupe d'intervention exécutive (N = 82, M = 8,3 ± 0,8 ans, 43 filles) ou contrôle actif (N = 80, M = 8,5 ± 0,9 ans, 36 filles). L'expérimentation a été menée en accord avec les normes nationales et internationales qui régissent la participation d'humains à la recherche. La participation des enfants se faisait sur le volontariat, après l'obtention d'un consentement éclairé des responsables légaux des enfants.

Matériel et procédure

L'ensemble du matériel et des procédures a été strictement identique à ceux de la première expérimentation, hormis que (a) les enseignants répartissaient la moitié de leur classe dans le groupe d'intervention exécutive et l'autre moitié dans le groupe d'intervention contrôle, (b) les interventions étaient faites en groupe, et (c) le post-test immédiat était réalisé par les élèves en groupe classe, juste après l'intervention pédagogique.

Les enseignants de CE1 et CE2 (N = 9) étaient recrutés via la plateforme numérique et collaborative Lea.fr. Cette dernière nous a permis de solliciter les enseignants, les former à la méthodologie expérimentale, télécharger le matériel utilisé pour l'intervention en classe et la tester et rassembler les données collectées par les enseignants aux trois évaluations. Les enseignants étaient principalement formés à animer les interventions exécutive et contrôle et à la méthodologie scientifique, avec un focus tout particulier sur le fait qu'il était impératif de strictement suivre le protocole expérimental établi pour chaque intervention afin que les effets observés soient attribués à l'intervention pédagogique et non pas à d'autres variables.

Résultats

Pour chaque enfant, nous avons calculé séparément le nombre de bonnes réponses de l'élève pour les problèmes incongruents et congruents, et ce, pour les trois évaluations. Les participants outliers ont été exclus sur la base des résidus du modèle linéaire pour les items congruents et incongruents au pré-test, post-test immédiat et post-test différé. De plus, les données différant de 3 MAD de la médiane du résidu ont été exclues. Douze enfants ont été exclus des analyses car ils avaient des données manquantes à l'une ou plusieurs des évaluations.

Une 3 (Temps : pré-test *vs* post-test immédiat *vs* post-test différé) x 2 (Problème arithmétique à contenus verbaux : congruent *vs* incongruent) x 2 (Groupe d'intervention : exécutive *vs* contrôle) analyse de la variance à mesures répétées (ANOVA) sur le nombre de bonnes réponses en résolution de problèmes arithmétiques à contenus verbaux montrait un effet d'interaction entre le temps, le problème arithmétique à contenus verbaux et le groupe, $F(2, 296) = 6{,}02$, $p = .003$, $\eta^2_p = .04$ (Tableau 7). Il y avait un effet principal du problème arithmétique à contenus verbaux, $F(1,148) = 131{,}99$, $p < .001$, $\eta^2_p = .47$, avec de meilleures performances aux items congruents qu'incongruents, et un effet principal du temps, $F(2, 296) = 4{,}38$, $p = .013$, $\eta^2_p = .03$. Cependant, il n'y avait pas d'effet principal du groupe d'intervention pédagogique, $F(1,148) = 1{,}85$, $p = .17$.

Tableau 7. Le nombre de bonnes réponses des élèves aux trois évaluations aux problèmes arithmétiques à contenus verbaux congruents et incongruents, en fonction du groupe d'intervention pédagogique. Les écart-types sont entre parenthèses.

	Problèmes congruents		Problèmes incongruents	
	Intervention contrôle	Intervention exécutive	Intervention contrôle	Intervention exécutive
Pré-test	8.26 (2.4)	8.53 (2.1)	4.36 (3.5)	4.55 (3.3)
Post-test immédiat	8.2 (2.7)	8.08 (2.5)	4.49 (3.6)	5.62 (3.4)
Post-test différé	8.42 (2.5)	8.11 (2.8)	4.61 (4)	6.2 (3.4)

Une 3 (Temps : pré-test *vs* post-test immédiat *vs* post-test différé) x 2 (Groupe d'intervention : exécutive *vs* contrôle) ANOVA à mesures répétées sur le nombre de bonnes réponses aux problèmes arithmétiques à contenus verbaux incongruents a montré un effet d'interaction entre le temps et le groupe d'intervention, $F(2, 296) = 5.27$, $p = .006$, $\eta^2_p = .03$. Il y avait un effet principal du temps, $F(2, 296) = 9{,}57$, $p < .001$, $\eta^2_p = .06$, mais pas d'effet principal du groupe d'intervention pédagogique, $F(1, 148) = 3{,}52$, $p = .06$. De plus, les enfants étaient plus performants pour résoudre les items incongruents au post-test immédiat juste après

avoir suivi l'intervention exécutive, plutôt qu'au pré-test, t(73) = 3,09, p = .001, d = 0,36, et au post-test différé plutôt qu'au pré-test, t(73) = 4,62, p < .001, d = 0,54. Dans l'intervention contrôle, on observe que les enfants réussissent aussi bien les items incongruents au pré-test qu'au post-test immédiat, t(75) < 1, et qu'au post-test différé, t(75) < 1. Par ailleurs, les enfants du groupe d'intervention exécutive étaient plus performants pour résoudre les problèmes arithmétiques à contenus verbaux incongruents, que les élèves ayant suivis l'intervention contrôle au post-test immédiat, t(148) = 1.97, p = .02, d = 0,32, ainsi qu'au post-test différé, t(148) = 2.63, p = .005, d = 0,43. Nous avons observé aucune différence entre les deux groupes au pré-test, t(148) < 1 (*cf.*, Figure 24).

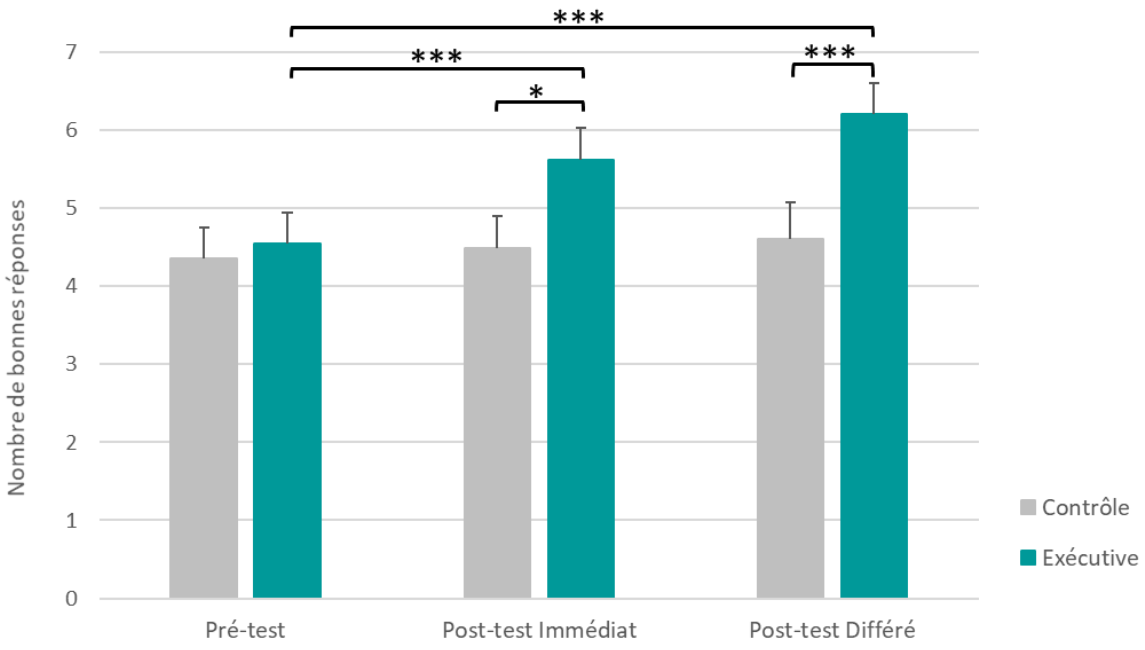


*Figure 24. Le nombre de bonnes réponses aux problèmes incongruents aux trois évaluations en fonction du groupe d'intervention pédagogique. Les barres d'erreurs représentent l'erreur-type de la moyenne. * p < .05, *** p < .001.*

Une 3 (Temps : pré-test *vs* post-test immédiat *vs* post-test différé) x 2 (Groupe d'intervention : exécutive *vs* contrôle) ANOVA à mesures répétées sur le nombre de bonnes réponses aux problèmes arithmétiques à contenus verbaux congruents n'a pas permis de montrer un effet d'interaction significatif entre le temps et le groupe d'intervention, F(2, 296)

= 1.33, p = .27 (*cf.* Figure 25). Il n'y avait pas non plus d'effet principal du temps F(2, 296) = 1.01, p = 37, η^2_p = .04, ou du groupe d'intervention pédagogique, F(1,148) < 1.

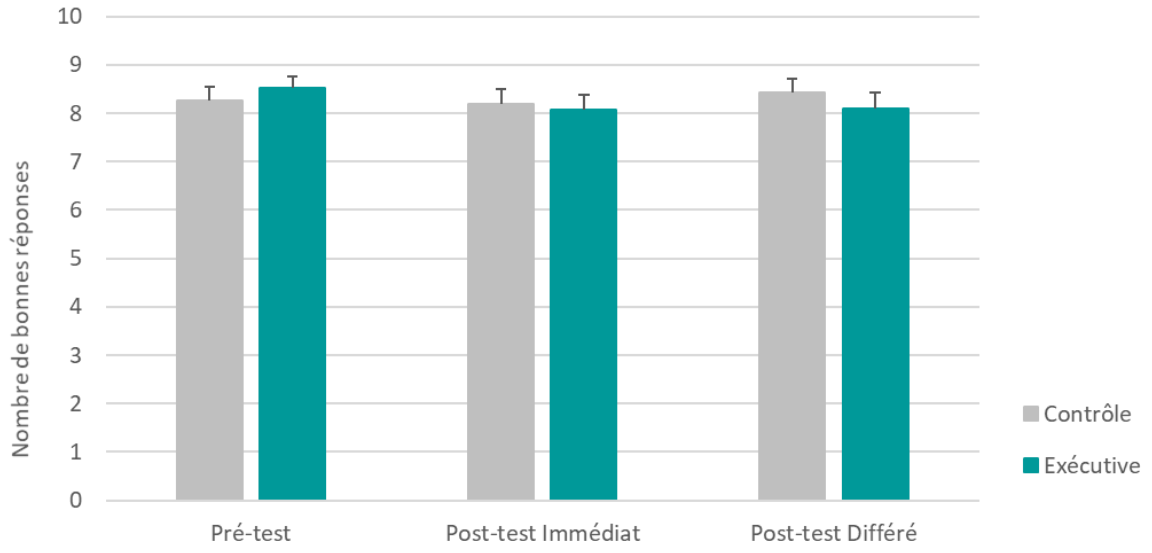


Figure 25. Le nombre de bonnes réponses aux problèmes congruents aux trois évaluations en fonction du groupe d'intervention pédagogique. Les barres d'erreurs représentent l'erreur-type de la moyenne.

Discussion

L'expérimentation 2 réplique les résultats de la première expérimentation alors que les enseignants menaient l'intervention pédagogique dans leur propre classe, collectivement. Comme dans la première expérimentation, en accord avec les études précédentes (Riley & Greeno, 1988; Schumacher & Fuchs, 2012; Verschaffel, 1994), et avec les résultats de notre étude 2, nous observons que les enfants de 7 à 10 ans réussissent mieux les problèmes arithmétiques à contenus verbaux où le terme relationnel (*e.g.* « moins que ») est congruent avec l'opération à choisir (*i.e.* soustraction), plutôt que ceux où le terme relationnel (*e.g.* « plus que ») est incongruent avec l'opération à réaliser (*i.e.* soustraction). De plus, nous avons trouvé qu'enseigner aux enfants comment inhiber leur stratégie trompeuse « additionner si plus, soustraire si moins » dans le contexte des items incongruents améliore les performances des

élèves de 7 à 10 ans à résoudre ces problèmes, pas seulement immédiatement après l'intervention pédagogique, mais aussi cinq jours après. Nous démontrons avec cette expérimentation qu'une intervention exécutive basée sur l'apprentissage de la stratégie surapprise « additionner si plus, soustraire si moins » peut améliorer la résolution de problèmes arithmétiques à contenus verbaux incongruents chez les élèves d'âge scolaire quand cette dernière est menée collectivement par les enseignants dans leur classe (*i.e.* en demi-classe).

Nos résultats suggèrent également qu'un projet en ligne de science participative dans lequel les enseignants sont en charge de la collection des données au pré-test, post-test immédiat et post-test différé, l'assignation aléatoire des élèves à un groupe d'intervention et de l'exécution des interventions dans la classe, peut être utilisé par les enseignants pour évaluer les effets d'interventions pédagogiques dans leur propre classe en adoptant une méthodologie expérimentale. Adopter une telle approche peut alors permettre de combler le fossé entre les chercheurs et les non-chercheurs, ce qui pourrait prévenir la diffusion de neuromythes dans la communauté enseignante (Howard-Jones, 2014).

Bien que nous ayons répliqué les résultats de la première expérimentation, nous notons plusieurs biais qui pourraient affecter la fiabilité des résultats rapportés dans cette seconde expérimentation. En effet, le fait que les enseignants dispensent les interventions pédagogiques, administrent et cotent les problèmes arithmétiques pendant les évaluations, pourrait avoir induit un effet des attentes de l'expérimentateur. Malgré notre tentative d'alléger certains de ces biais en informant les enseignants à propos des potentiels biais et de comment ces biais étaient généralement contrôlés, des études additionnelles seraient nécessaires pour déterminer plus systématiquement la mesure selon laquelle ces biais peuvent être contrôlés et sont susceptibles d'affecter les résultats rapportés dans les projets de recherche participative.

Discussion générale

Cette troisième étude avait pour but de déterminer si une intervention pédagogique basée sur l'apprentissage à identifier et résoudre un conflit entre le terme relationnel et l'opération arithmétique à réaliser en inhibant l'heuristique « additionner si plus, soustraire si moins » pouvait aider les élèves de 7 à 10 ans à surmonter leur erreur d'inversion quand ils résolvent des problèmes arithmétiques à contenus verbaux dont le référent est inconnu. Autrement dit, nous souhaitions observer si les entrainements basés sur la stratégie initialement proposés autour de biais de raisonnement logique (Moutier et al., 2002; Moutier & Houdé, 2003) pouvaient également montrer leur effet lorsqu'ils étaient adaptés à la résolution de problèmes arithmétiques incongruents. Les résultats des expérimentations 1 et 2 montrent que (a) les enfants de 7 à 10 ans commettent plus d'erreurs dans la résolution de problèmes arithmétique où le terme relationnel est incongruent plutôt que congruent avec l'opération arithmétiques à réaliser pour réussir, et que (b) apprendre à inhiber la stratégie surapprise « additionner si plus, soustraire si moins » (*i.e.* intervention exécutive) peut aider les élèves de 7 à 10 ans à surmonter leurs erreurs d'inversion immédiatement après cette intervention, mais aussi cinq jour après cette dernière. De plus, nous avons trouvé dans ces expérimentations aucun effet néfaste de l'apprentissage à inhiber la stratégie trompeuse « additionner si plus, soustraire si moins » dans la résolution de problèmes arithmétiques dans lesquels le terme relationnel est congruent avec l'opération à réaliser, où la stratégie « additionner si plus, soustraire si moins » est effective. Par ailleurs, nous avons montré que l'intervention exécutive aidait les élèves de 7 à 10 ans à surmonter leurs erreurs systématiques dans la résolution de problèmes arithmétiques dont le référent est inconnu quand elle est conduite par les enseignants dans leur classe avec un groupe d'élèves (*i.e.* en demi-classe, voir Expérimentation 2), ce qui démontre la validité écologique de l'intervention.

La deuxième étude ayant permis de mettre en lumière différentes heuristiques auxquelles les élèves étaient confrontés, et étant donné que la difficulté à inhiber une stratégie trompeuse explique partiellement les erreurs systématiques dans de nombreux contextes d'apprentissages scolaires, comme la conjugaison de verbes (Lanoë et al., 2016), la discrimination de lettres (Ahr et al., 2017; Borst, Ahr, et al., 2015; Brault Foisy et al., 2017), la comparaison de nombres rationnels (Roell, Viarouge, Hilscher, et al., 2019; Roell, Viarouge, Houdé, et al., 2019; Rossi et al., 2019), ou encore les tâches piagétiennes (Borst, Poirel, Pineau, Cassotti, & Houdé, 2012c; Borst et al., 2012a; Houdé et al., 2011), les prochaines études devront déterminer si une intervention exécutive similaire peut être efficiente pour aider les enfants à surmonter leurs erreurs systématiques dans le contexte de ces apprentissages scolaires.

Étude 4

Apprendre à inhiber une heuristique trompeuse pour surmonter les difficultés dans la tâche de conservation du nombre : Convergence de résultats obtenus au laboratoire et en recherche participative.

Létang, M., & Garbarg-Chenon, J. (2020). *Entrainer le cerveau à résister – Coffret Non-lecteurs*. Nathan.

Résumé

Avant 7 ans, il est difficile pour les enfants de réussir la tâche piagétienne de conservation du nombre. Cette difficulté relève en partie du besoin d'inhiber l'heuristique trompeuse « longueur = nombre » (Houdé & Guichart, 2001). Cette étude examine dans deux expérimentations si entraîner les élèves de 4 à 6 ans à inhiber l'heuristique trompeuse « longueur = nombre » (intervention exécutive) est plus efficace que de leur enseigner l'algorithme à utiliser (intervention contrôle). Dans une première expérimentation, les interventions et les évaluations étaient menées par un chercheur, alors que dans une seconde expérimentation, les enseignants étaient en charge d'évaluer les élèves et de mener les interventions en groupe de 5 à 6 élèves. Les résultats de ces deux expérimentations étaient convergents et ont montré qu'apprendre à inhiber une heuristique était plus efficace qu'un simple rappel de l'algorithme pour aider les élèves de maternelle à réussir la tâche de conservation du nombre immédiatement et cinq jours après l'intervention pédagogique.

Mots-clés : Conservation du nombre, Contrôle inhibiteur, Entrainement tâche spécifique, Recherche participative

Introduction

Les travaux piagétiens ont montré qu'avant 7 ans, les enfants étaient en difficulté pour résoudre la tâche de conservation du nombre (Piaget, 1952). Dans cette tâche, on présente à des participants deux rangées contenant le même nombre de jetons. On demande alors aux enfants de reconnaître qu'il y a le même nombre de jetons. Une fois l'égalité reconnue, sous les yeux de l'enfant, une des deux rangées est modifiée dans sa longueur, sans que le nombre de jetons change (*i.e.* l'espace entre les jetons de l'une des deux rangées va donc être augmenté). On demande alors une deuxième fois à l'enfant si le nombre de jetons dans les deux rangées est identique ou non. Jusqu'à environ 7 ans, les enfants sont considérés comme non-conservants car ils désignent la ligne la plus longue visuellement comme étant la ligne comportant le plus de jetons. Plus tard, aux alentours de 7-8 ans, les enfants sont désignés comme conservants car ils réussissent la tâche et répondent qu'il y a le même nombre de jetons dans les deux rangées, indépendamment de leur présentation visuo-spatiale.

Dans le modèle de Piaget, le principe de conservation joue un rôle central dans l'acquisition des compétences logico-mathématiques (Piaget, 1952). Cela correspond à la capacité de comprendre que deux quantités égales demeurent égales malgré une transformation apparente, pourvu que rien ne soit enlevé ni ajouté aux deux entités. Ainsi, la réussite des enfants à la tâche de conservation du nombre serait, pour Piaget, liée à deux choses : la compréhension de l'équivalence des quantités numériques et l'utilisation de l'opération de réversibilité, qui est la capacité à exécuter ou voir une même action dans les deux sens de parcours, en ayant conscience qu'il s'agit de la même action. L'enfant non-conservant traiterait donc l'information uniquement de manière purement intuitive et perceptive. Autrement dit, dans la tâche piagétienne de conservation du nombre, un enfant étant dans la phase

préopératoire basera son jugement uniquement sur la propriété visuo-spatiale de la longueur pour répondre. Il sera donc induit en erreur par la stratégie intuitive « longueur = nombre ».

Néanmoins, il semble que, contrairement à ce que pensait Piaget, la capacité de conservation du nombre pourrait apparaître plus précocement sous l'effet d'apprentissages spécifiques (Halford & Fullerton, 1970; Roll, 1970; Wallach, Wall, & Anderson, 1967). Par exemple, un apprentissage à l'invariance de la longueur par rapport au nombre permet à 66% d'enfants non-conservants de 5 à 7 ans de devenir conservants (Halford & Fullerton, 1970). Une autre étude a également montré qu'il était possible de rendre des enfants non-conservants, conservants, mais cette fois par un entrainement spécifique autour du principe de réversibilité (Roll, 1970).

Cependant, les néo-piagétiens suggèrent que répondre correctement à la tâche de conservation du nombre relèverait plus de la capacité à résister à une interférence qu'à la capacité de comprendre la logique du problème (Dempster, 1995). Une étude de 2001 mettant en place un amorçage négatif autour de la conservation du nombre chez des enfants de 9-10 ans a permis de confirmer cette idée (Houdé & Guichart, 2001). Cette étude a montré que répondre à la tâche de conservation du nombre, nécessite l'inhibition de la stratégie visuo-spatiale trompeuse « longueur = nombre ». Ainsi, les études antérieures indiquent que la compétence à réussir la tâche piagétienne de conservation du nombre ne serait pas seulement due à la capacité à comprendre la réversibilité des opérations et la capacité de comptage, mais aussi à la compétence à inhiber la stratégie trompeuse « longueur = nombre » (Houdé & Guichart, 2001).

Dans cette étude 4, nous souhaitons démontrer qu'une intervention pédagogique basée sur l'apprentissage à identifier et résoudre le conflit entre la présentation visuelle de deux rangées d'items et le nombre d'items dans ces rangées peut aider les élèves de maternelle à surmonter leur erreur lorsqu'ils doivent résoudre la tâche piagétienne de conservation du nombre. Cette intervention tâche spécifique, initialement utilisée dans les biais de raisonnement

dans divers problèmes logiques (Cassotti & Moutier, 2010; Houdé & Moutier, 1996; Moutier et al., 2002; Rossi et al., 2015), a montré son intérêt dans l'étude 3 avec des enfants d'âge scolaire sur la résolution de problèmes arithmétiques à contenus verbaux. Dans l'étude présente, l'intervention exécutive repose donc sur l'entrainement à inhiber la stratégie trompeuse « longueur = nombre », pour pouvoir activer la stratégie appropriée qui correspond à la comparaison du nombre d'items dans les deux rangées. L'objectif est donc d'observer si une intervention pédagogique utilisant des alertes exécutives verbales et visuo-spatiales pour apprendre aux enfants de 4 à 6 ans à inhiber l'heuristique « longueur = nombre » associées à un rappel de l'algorithme à utiliser pour résoudre le problème est plus efficace qu'un simple rappel de l'algorithme. On opposait donc cette intervention exécutive à une intervention logique, uniquement basée sur l'apprentissage de la règle à utiliser pour réussir.

Dans cette quatrième étude, nous avons reproduit le schéma de l'étude 3 et nous avons mené deux expérimentations pour mesurer l'efficacité d'une intervention exécutive basée sur l'inhibition de la stratégie « longueur = nombre » dans la tâche de conservation du nombre. Chacune des deux expérimentations commençait par un pré-test où on évaluait la compétence de conservation des enfants de 4 à 6 ans. Pour cela, on proposait une tâche de conservation du nombre aux enfants en leur présentant deux situations. Dans une première situation, la situation initiale, on présentait aux élèves deux rangées de sept jetons de même longueur. Dans cette situation congruente, il était nécessaire que les élèves reconnaissent l'égalité numérique des deux rangées pour poursuivre l'expérimentation. Il y avait ensuite la situation piège, où on effectuait, sous les yeux de l'enfant, la transformation spatiale de l'une des deux rangées. La longueur des rangées devenait donc incongruente avec le nombre de jetons présents. On posait alors la question conflit à l'enfant : « Est-ce qu'il y a le même nombre de jetons dans les deux rangées ? ». Les élèves étaient ensuite assignés à l'un des deux groupes d'intervention : l'intervention exécutive ou l'intervention contrôle. Immédiatement après (*i.e.* le post-test

immédiat) et 5 jours plus tard (*i.e.* le post-test différé), les élèves passaient de nouveau cette tâche de conservation du nombre. Dans la première expérimentation, les trois évaluations et les interventions pédagogiques étaient menées par un expérimentateur du laboratoire, en individuel, dans l'école de l'enfant. En revanche, la seconde expérimentation était une recherche participative où les trois évaluations et les interventions pédagogiques étaient effectuées par l'enseignant dans sa classe avec des groupes d'élèves.

Pour chacune de ces deux expérimentations, nous avons fait l'hypothèse que, si les erreurs des élèves dans la tâche de conservation du nombre étaient dues à un manque d'inhibition de l'heuristique « longueur = nombre », alors le nombre d'enfants de 4 à 6 ans réussissant la tâche de conservation du nombre devrait être plus grand après une intervention exécutive apprenant aux élèves à inhiber leur heuristique trompeuse et rappelant la règle à suivre (*i.e.* l'intervention exécutive) plutôt qu'une intervention uniquement basée sur l'apprentissage de la règle à suivre pour réussir (*i.e.* l'intervention contrôle). De plus, si les enfants renforcent leur capacité à inhiber leur heuristique trompeuse, alors cette amélioration du nombre d'enfants conservants devrait se maintenir cinq jours après l'intervention. Ainsi, on devrait observer plus d'élèves conservants au post-test différé qu'au pré-test pour les élèves ayant reçus l'intervention exécutive.

Expérimentation 1

Méthode

Participants

La taille d'échantillon a été déterminée par une analyse de puissance a priori utilisant G*Power 3.1.9.2 (Faul et al., 2009). Elle a révélé qu'un minimum de 50 enfants par groupe était

nécessaire pour détecter une taille d'effet entre moyen et grand de 0,4 (selon la convention de taille d'effet de Cohen) avec un Khi² mesurant l'effet de l'Evaluation (pré-test *vs.* post-test immédiat *vs.* post-test différé) et de l'Intervention pédagogique (exécutive *vs.* contrôle) avec une puissance (1 - β) fixée à .80 et un α fixé à .05. Nous avons recruté 48 enfants de 4 à 6 ans. Les enfants étaient répartis aléatoirement dans l'un des deux groupes : le groupe d'intervention exécutive (N = 24, M = 5,2 ± 0,6 ans, 12 filles) ou le groupe d'intervention contrôle (N = 24, M = 5,2 ± 0,6 ans, 10 filles). L'expérimentation a été menée en accord avec les normes nationales et internationales qui régissent la participation d'humains à la recherche. La participation des enfants se faisait sur le volontariat, après l'obtention d'un consentement éclairé des responsables légaux des enfants.

Matériel

Evaluations : pré-test, post-test immédiat et post-test différé

La compétence de conservation du nombre des élèves était mesurée par le biais d'une tâche de conservation du nombre proposée par l'expérimentateur en individuel. A chaque évaluation, on présentait une rangée de 7 jetons verts à l'élève et on lui demandait de construire, en dessous de celle-ci, une seconde rangée de jetons jaunes. Une fois les deux rangées construites à l'identique (*i.e.* en nombre et en présentation visuo-spatiale), on faisait constater à l'enfant que les deux rangées possédaient bien le même nombre de jetons. On espaçait ensuite les jetons jaunes, sous les yeux de l'enfant, de façon à ce que la rangée jaune soit plus longue que la rangée verte et on lui demandait « Est-ce qu'il y a le même nombre de jetons jaunes que de jetons verts ? ». Si l'enfant répondait par l'affirmative, il était considéré comme conservant. A l'inverse, si l'enfant répondait par la négative, il était considéré comme non-conservant. Pour

chaque évaluation, nous déterminions si l'enfant donnait une réponse conservante ou non-conservante.

L'intervention exécutive

L'intervention exécutive durait 10 minutes et était réalisée en individuel (*cf.* Annexe 14). Son but était d'apprendre aux enfants à inhiber leur heuristique surapprise « longueur = nombre » lorsque cela les induit en erreur. L'intervention comportait des alertes exécutives verbales et visuo-spatiales pour apprendre aux élèves à inhiber leur stratégie trompeuse, telles que « Attention ! Dans cet exercice il y a un piège ! Certains enfants pensent qu'il y a plus de jetons quand ils sont écartés. Mais il y en a toujours le même nombre. Ils se trompent car ils pensent que quand c'est plus long, il y en a plus. Cette habitude nous fait tomber dans un piège ». Cette intervention proposait également une explication de la stratégie appropriée pour réussir la tâche, telle que « Pour réussir et trouver la bonne réponse, il faut donc faire attention au nombre de jetons, et pas à la longueur de la rangée ». Ensuite, on disait aux enfants « Ici tu crois que c'est simple et tu ne fais attention qu'à la longueur des rangées, c'est le piège dont on a parlé. Pour ne pas tomber dans le piège, il faut que tu fasses attention au nombre de jetons et pas à la longueur de la rangée ». L'intervention exécutive était associée à la manipulation active d'un attrape-piège, une planche transparente hachurée représentant le CI à exercer contre l'heuristique, ainsi qu'un cercle central ajouré (*i.e.* sans hachure) représentant la réponse algorithmique. Pour chaque énoncé, les élèves disposaient de deux cartons : un carton représentant la bonne réponse, celle apportée par l'algorithme, et un carton représentant la mauvaise réponse, celle apportée par l'heuristique. Les enfants étaient donc invités à expliquer pourquoi la réponse apportée par la stratégie trompeuse « longueur = nombre » était incorrecte et à placer la carte-réponse correspondante sous les hachures de la planche transparente. Les

enfants étaient ensuite invités à choisir la carte correspondant à la bonne réponse et à la placer sur le rond central de l'attrape-piège.

L'intervention contrôle active

Comme dans l'intervention exécutive, l'intervention contrôle durait 10 minutes était réalisée individuellement (*cf.* Annexe 15). L'intervention ne comportait aucune alerte exécutive et était ciblée autour de l'explication de la stratégie appropriée sur laquelle s'appuyer pour résoudre le problème. On disait aux enfants « Pour répondre correctement, il faut prendre en compte le nombre de jetons sur la ligne. Je n'ai ni ajouté, ni retiré de jetons. Je les ai juste écartés. Il y a toujours 7 jetons dans les deux lignes ». Pour standardiser le plus possible les deux interventions, les enfants manipulaient un leurre d'attrape-piège, une boîte à réponses. Cet outil était constitué d'une planche transparente avec une ligne horizontale en son centre. Les enfants devaient alors placer la bonne réponse au-dessus de cette ligne, et la mauvaise réponse en dessous de celle-ci.

Procédure

Les enfants étaient évalués individuellement. Le pré-test se déroulait trois jours avant l'intervention pédagogique. Les élèves étaient ensuite assignés aléatoirement à un des deux groupes d'intervention. Chaque enfant recevait en individuel l'une des deux interventions menées par l'expérimentateur, dans une pièce calme à côté de la classe de l'enfant. Le post-test immédiat était effectué individuellement juste après l'intervention pédagogique, et le post-test différé était réalisé cinq jours après l'intervention (*cf.* Figure 26). Le matériel utilisé lors des

évaluations était des jetons ronds jaunes et verts alors que le matériel utilisait lors de l'intervention pédagogique était des carrés rouges et bleus.

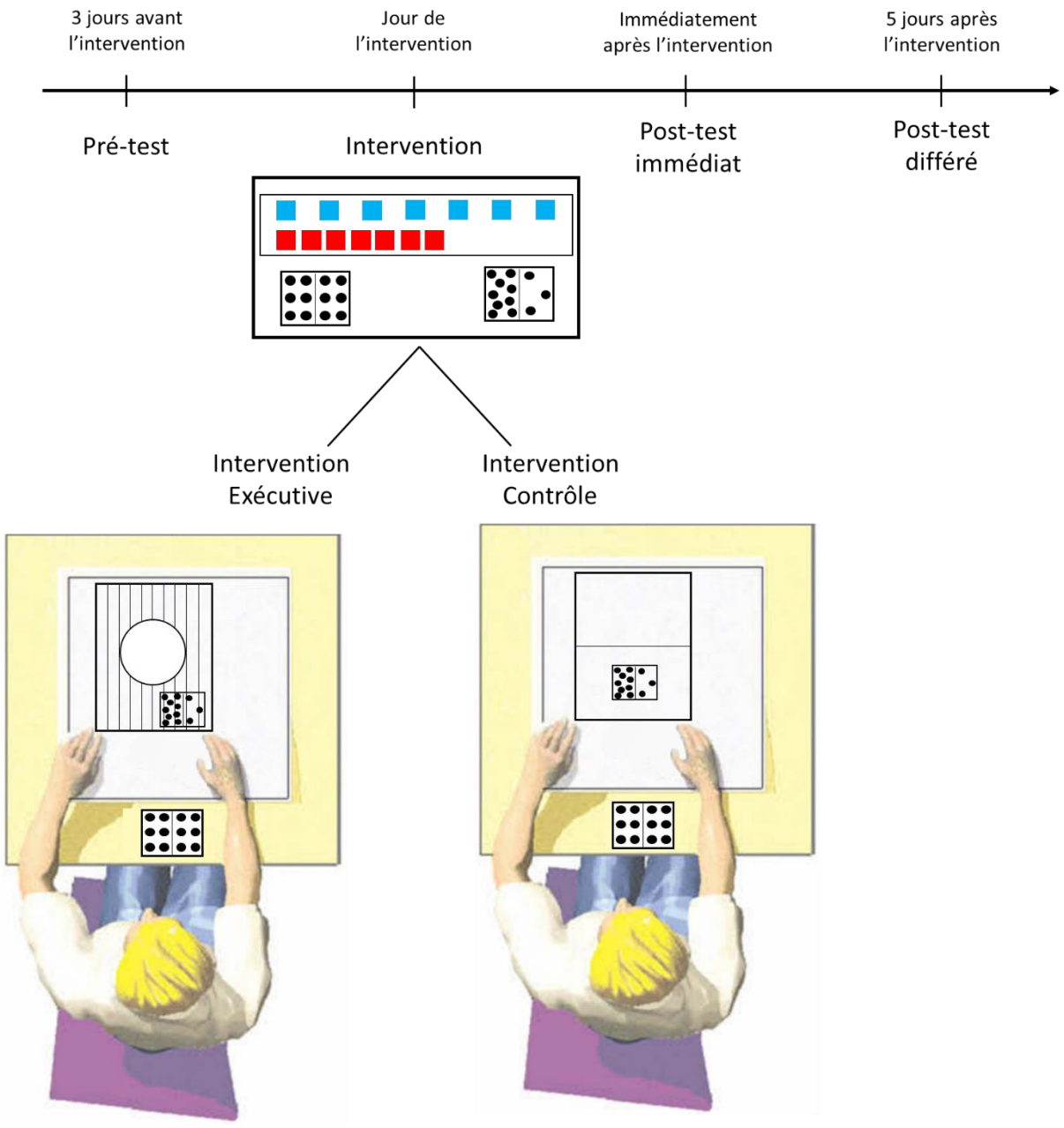


Figure 26. La procédure expérimentale utilisée en fonction du groupe d'intervention.

Résultats

Pour chaque évaluation et chaque groupe, nous avons calculé le nombre d'enfants ayant une réponse conservante ou non-conservante (*cf.* Tableau 8). Nous avons utilisé des tests statistiques non-paramétriques pour mesurer l'effet de l'Evaluation (pré-test *vs.* post-test immédiat *vs.* post-test différé) et de l'Intervention pédagogique (exécutive *vs.* contrôle).

Tableau 8. Le nombre d'élèves ayant une réponse conservante ou non-conservante à la tâche de conservation du nombre, en fonction du groupe d'intervention et de l'évaluation.

	Réponse conservante		Réponse non-conservante	
	Intervention contrôle	Intervention Exécutive	Intervention contrôle	Intervention Exécutive
Pré-test	0	0	24	24
Post-test immédiat	12	21	12	3
Post-test différé	16	19	8	5

Au niveau du pré-test, on observait aucune différence significative entre nos deux groupes ($p = 1$, test de Fisher exact). En post-test immédiat, on observait une différence significative entre nos deux groupes avec un nombre d'élèves ayant une réponse conservante plus grand dans le groupe d'intervention exécutive que dans le groupe ayant suivi l'intervention contrôle, $\chi^2(1,48) = 7,85$, $p = .005$. En revanche, au post-test différé, on observait qu'il n'y pas de différence significative entre nos deux groupes, $\chi^2(1,48) < 1$, $p = .33$. De plus, pour les élèves ayant suivi l'intervention exécutive, il existait une différence significative de la distribution des performances entre le pré-test et le post-test immédiat ($p < .001$, test de Fisher exact) et le pré-test et le post-test différé ($p < .001$, test de Fisher exact). Cependant, il n'existait pas de différence significative entre le nombre d'élèves ayant une réponse conservante au post-test immédiat et au post-test différé, Mc Nemar $\chi^2(1,24) < 1$, $p = .414$.

Pour les élèves du groupe contrôle, il existait une différence significative de la distribution des performances entre le pré-test et le post-test ($p < .001$, test de Fisher exact) et entre le pré-test et le post-test différé ($p < .001$, test de Fisher exact). Cependant, il n'existait pas de différence de la distribution des performances entre les deux post-tests, Mc Nemar $\chi^2(1,24) = 1$, $p = .317$ (*cf.* Figure 27).

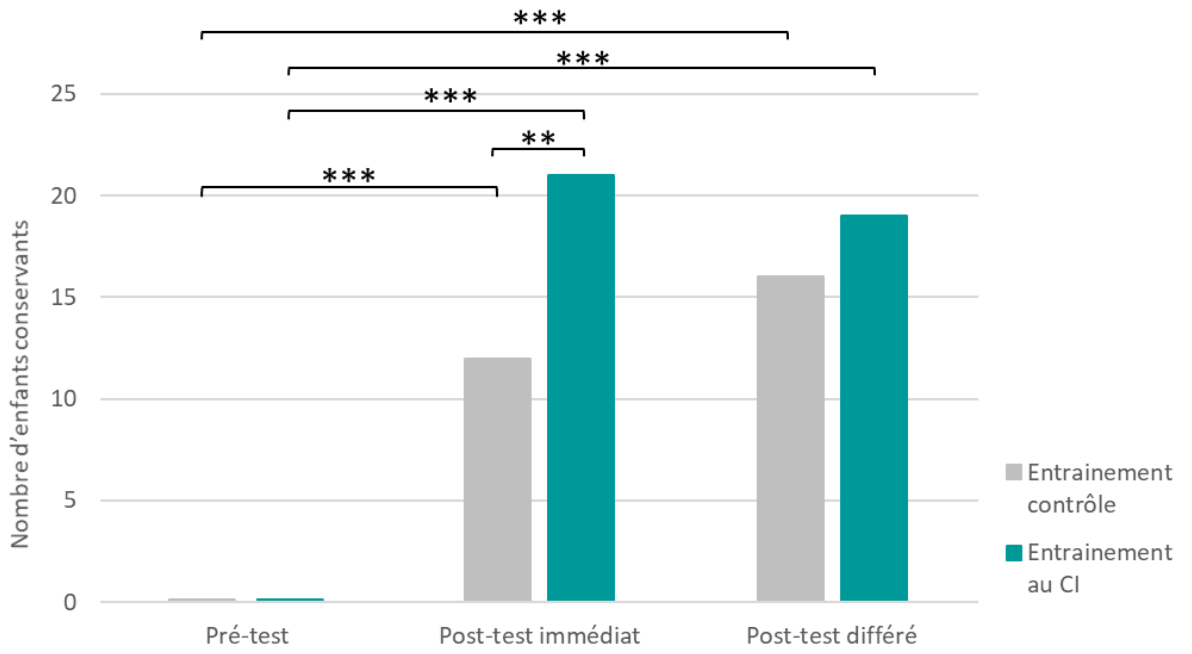


*Figure 27. Le nombre d'élèves ayant une réponse non-conservante ou conservante aux trois évaluations en fonction du groupe d'intervention pédagogique. ** $p < .01$, *** $p < .001$.*

Discussion

En accord avec les observations de Piaget, on observe que les enfants de 4 à 6 ans, sans intervention pédagogique préalable, échouent à la tâche de conservation du nombre (Piaget, 1952). En effet, ces derniers savent reconnaître que deux rangées ayant une présentation visuelle similaire comportent le même nombre d'items, en revanche ils échouent lorsque la présentation visuelle est modifiée alors même que le nombre de jetons présentés reste identique. La difficulté des élèves à résoudre cette tâche de conservation du nombre est en partie causée

par leur difficulté à inhiber l'heuristique « longueur = nombre », renforcée dans de nombreuses tâches quotidiennes (*e.g.* déterminer quelle étagère de la bibliothèque comporte le plus de livres), qui devient trompeuse lorsque la présentation visuo-spatiale des items est incongruente avec le nombre d'items. Cette première expérimentation permet donc de montrer qu'un rappel de la règle à suivre pour réussir la tâche de conservation du nombre permet aux enfants de 4 à 6 ans d'avoir ensuite une réponse conservante. Cependant, nous observons que lorsque ce rappel est associé à un apprentissage à inhiber la stratégie trompeuse « longueur = nombre » quand la présentation visuelle est incongruente avec le nombre d'items, l'intervention est plus efficace que le rappel de la règle seul. Cet effet était également observé dans une étude précédente chez des enfants de 10-11 ans dans le domaine du raisonnement logique (Moutier et al., 2002). Enfin, les bénéfices des deux interventions semblent se maintenir au cours du temps puisque nous n'observons pas de différence de performance entre l'évaluation réalisée immédiatement après l'intervention et celle réalisée cinq jours après.

Ces résultats sont intéressants, cependant ils se limitent à une utilisation assez expérimentale où les évaluations et l'intervention sont menées par un expérimentateur du laboratoire en individuel avec l'élève. Ces conditions sont donc assez éloignées de ce qu'on retrouve dans une salle de classe habituelle. Il semble donc intéressant de tester ces deux interventions pédagogiques dans des conditions plus écologiques où l'enseignant est expérimentateur dans sa propre classe et propose les interventions aux élèves répartis en groupe. C'est le but de la seconde expérimentation.

Expérimentation 2

Comme dans l'étude 3, cette expérimentation 2 a pour objectif de répliquer les découvertes de l'expérimentation 1 alors que l'enseignant est expérimentateur dans sa classe. Cette seconde

expérimentation est donc un projet de recherche participative où chaque enseignant était responsable de la récolte des données aux trois évaluations, de la répartition des élèves au sein des deux groupes d'intervention, et de l'application des interventions pédagogiques, en groupes de 5 à 6 élèves. Les enseignants participants étaient volontaires et étaient recrutés sur la plateforme numérique et collaborative Lea.fr qui leur permettait d'être en contact avec les chercheurs à chaque étape du projet. Dans chaque classe, l'enseignant devait répartir aléatoirement ses élèves au sein des deux groupes d'intervention (*i.e.* exécutive ou contrôle). Cette division au sein de chaque classe permettait de contrôler l'effet maître (Nye et al., 2004).

Méthode

Participants

La taille d'échantillon a été déterminée par une analyse de puissance *a priori* utilisant G*Power 3.1.9.2 (Faul et al., 2009). Elle a révélé qu'un minimum de 50 enfants par groupe était nécessaire pour détecter une moyenne à grande taille d'effet de 0,40, avec un Khi² mesurant l'effet de l'Evaluation (pré-test *vs.* post-test immédiat *vs.* post-test différé) et de l'Intervention pédagogique (exécutive *vs.* contrôle) avec une puissance (1 - β) fixée à .80 et un α fixé à .05. Nous avons recruté 57 enfants de 4 à 6 ans. Les enfants étaientt réparti aléatoirement dans l'un des deux groupes : groupe d'intervention exécutive (N = 27, M = 5,5 ± 0,7 ans, 13 filles) ou contrôle actif (N = 30, M = 5,6 ± 0,8 ans, 10 filles). L'expérimentation a été menée en accord avec les normes nationales et internationales qui régissent la participation d'humains à la recherche. La participation des enfants se faisait sur le volontariat, après l'obtention d'un consentement éclairé des responsables légaux des enfants.

Matériel et procédure

L'ensemble du matériel et des procédures a été strictement identique à ceux de la première expérimentation, hormis que les enseignants répartissaient la moitié de leur classe dans le groupe d'intervention exécutive et l'autre moitié dans le groupe d'intervention contrôle, et que les interventions et les évaluations étaient faites en groupe de 5 à 6 élèves.

Les enseignants de MS et GS (N = 5) étaient recrutés via la plateforme numérique et collaborative Lea.fr. Cette dernière nous a permis de solliciter les enseignants, les former à la méthodologie expérimentale, télécharger le matériel utilisé pour l'intervention en classe et la tester et rassembler les données collectées par les enseignants aux trois évaluations. Les enseignants étaient principalement formés à animer les interventions exécutive et contrôle et à la méthodologie scientifique, avec un focus tout particulier sur le fait qu'il était impératif de strictement suivre le protocole expérimental établi pour chaque intervention afin que les effets observés soient attribués à l'intervention pédagogique et non pas à d'autres variables.

Résultats

Pour chaque évaluation et chaque groupe, nous avons calculé le nombre d'enfants ayant une réponse conservante ou non-conservante (*cf.* Tableau 9). Nous avons utilisé des tests statistiques non-paramétriques pour mesurer l'effet de l'Evaluation (pré-test *vs.* post-test immédiat *vs.* post-test différé) et de l'Intervention pédagogique (exécutive *vs.* contrôle).

Au niveau du pré-test, on n'observait aucune différence significative entre nos deux groupes (p = 1, test de Fisher exact). De plus, on constatait une différence significative entre nos deux groupes avec un nombre d'élèves ayant une réponse conservante plus grand dans le groupe d'intervention exécutive que dans le groupe ayant suivi l'intervention contrôle en post-

test immédiat, $\chi^2(1,57) = 4,46$, $p = .03$, et en post-test différé, $\chi^2(1,57) = 5,8$, $p = .01$. En outre, pour les élèves ayant suivi l'intervention exécutive, il existait une différence significative de la distribution des performances entre le pré-test et le post-test immédiat ($p < .001$, test de Fisher exact) et le pré-test et le post-test différé ($p < .001$, test de Fisher exact). Cependant, il n'existait pas de différence significative entre le nombre d'élèves ayant une réponse conservante au post-test immédiat et au post-test différé, Mc Nemar $\chi^2(1,27) = 1$, $p = .317$.

Tableau 9. Le nombre d'enfants ayant une réponse conservante ou non conservante en fonction de l'intervention pédagogique et de l'évaluation.

	Réponse conservante		Réponse non-conservante	
	Intervention contrôle	Intervention Exécutive	Intervention contrôle	Intervention Exécutive
Pré-test	0	0	30	27
Post-test immédiat	18	23	12	4
Post-test différé	14	22	16	5

Pour les élèves du groupe contrôle, il existait une différence significative de la distribution des performances entre le pré-test et le post-test ($p < .001$, test de Fisher exact) et entre le pré-test et le post-test différé ($p < .001$, test de Fisher exact). Cependant, il n'existait pas de différence de la distribution des performances entre les deux post-tests, Mc Nemar $\chi^2(1,30) = 2$, $p = .157$ (*cf.* Figure 28).

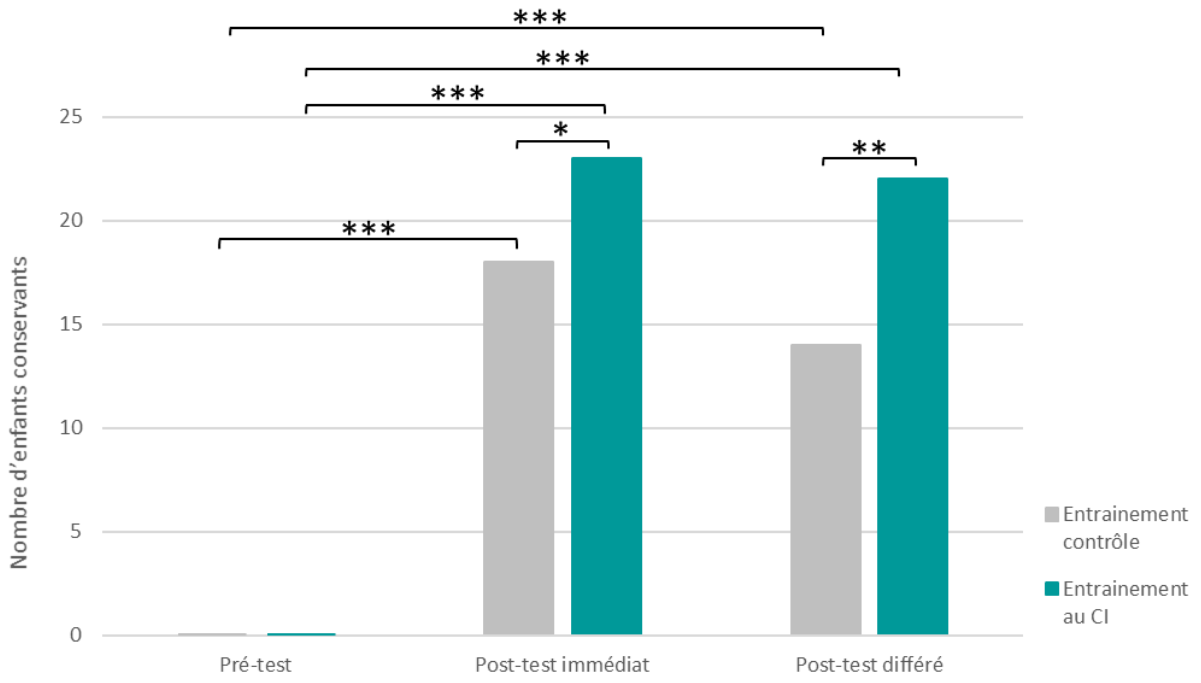


*Figure 28. Le nombre d'élèves ayant une réponse non-conservante ou conservante en fonction de l'évaluation et du type d'intervention pédagogique. * p < .05, ** p < .01, *** p < .001.*

Discussion

L'expérimentation 2 réplique les résultats de la première expérimentation, alors que celle-ci est conçue comme un projet de recherche participative où les enseignants sont expérimentateurs dans leur classe. Leur rôle était d'évaluer les élèves en pré-test, post-test immédiat et post-test différé, de répartir les élèves au sein des deux groupes d'intervention et de mener l'intervention pédagogique dans leur propre classe, collectivement. Comme dans la première expérimentation, nos résultats sont en accord avec les observations de Piaget selon lesquelles, avant 7 ans les enfants échouent à la tâche de conservation du nombre (Piaget, 1952). Nous avons également montré qu'un rappel de la règle permettait d'améliorer les compétences des élèves sur la tâche de conservation du nombre, immédiatement et cinq jours après ce rappel. En revanche, l'expérimentation démontrait que ce simple rappel de la règle à suivre était moins efficace qu'entrainer les enfants à inhiber la stratégie trompeuse « longueur = nombre » lorsque la

présentation visuelle des items était incongruente avec le nombre d'items. De plus, cet effet plus fort était observé immédiatement après l'intervention, mais aussi cinq jours après celle-ci. Cette expérimentation prouvait donc qu'une intervention exécutive basée sur l'apprentissage de l'heuristique trompeuse « longueur = nombre » était une pédagogie efficace pour aider les enfants de 4 à 6 ans à devenir conservants, même quand cette dernière était menée collectivement par les enseignants dans leur classe.

Les résultats de cette étude suggèrent qu'il est possible de faire de la recherche participative en ligne avec les enseignants. Il est donc possible de faire de la recherche sans intervention directe du chercheur dans la classe, où l'enseignant est en charge de la collecte des données aux évaluations, de la répartition des élèves au sein des deux groupes d'intervention et de l'exécution des interventions pédagogiques dans leur propre classe, le tout en respectant un protocole expérimental. Participer à ce type de projet permet d'enrichir la culture scientifique des non-chercheurs (Bonney et al., 2015), mais aussi de rapprocher le monde de l'éducation et de la recherche.

Cette étude comporte néanmoins plusieurs biais qui pourraient affecter la fiabilité des résultats rapportés dans cette seconde expérimentation. Le premier biais concerne le fait que les évaluations étaient faites en groupe de 5 à 6 élèves. En effet, lorsque les enseignants posaient la question conflit aux élèves (*i.e.* est-ce qu'il y a le même nombre de jetons dans les deux rangées ?), ils leur proposaient deux choix de réponses auxquels les élèves devaient lever la main pour s'identifier à l'une d'elle : « il y a le même nombre de jetons » ou « il n'y a pas le même nombre de jetons ». Nous avons fait ce choix de réponse pour nous adapter aux conditions du terrain. En effet, du fait de l'âge des élèves, ces derniers n'avaient pas la capacité d'écrire leur réponse individuellement. De plus, l'enseignant étant le seul intervenant dans sa classe et dans cette recherche, il n'était pas possible pour lui d'évaluer individuellement chaque élève. Il serait donc intéressant de mener des études supplémentaires pour connaître l'effet de

ce mode d'évaluation. Enfin, le second biais concernait le fait que les enseignants étaient les expérimentateurs de l'étude. En effet, en administrant et cotant les évaluations et en dispensant les interventions, il est possible qu'un effet des attentes de l'expérimentation soit induit. Nous avons tenté de contrecarrer ce biais en informant les enseignants de l'apparition possible de celui-ci, et de la manière dont il se formait ; néanmoins des études complémentaires permettraient de mesurer comment contrôler ce biais et à quel point il peut affecter les résultats d'une recherche participative.

Discussion générale

Cette étude 4 avait pour objectif de déterminer si une intervention pédagogique basée sur l'apprentissage à inhiber la stratégie trompeuse « longueur = nombre » dans la tâche piagétienne classique de conservation du nombre permettait aux élèves de 4 à 6 ans d'avoir une réponse conservante lorsque qu'il y a un conflit entre la présentation visuelle des items et le nombre d'items. Le but de cette étude était donc d'observer si l'entrainement spécifique initialement proposé autour de biais de raisonnement logique (Moutier et al., 2002; Moutier & Houdé, 2003) et autour de la résolution de problèmes arithmétiques dans l'étude 3, pouvait également montrer son effet chez des élèves de maternelles sur la tâche de conservation du nombre. Les résultats des expérimentations 1 et 2 montrent alors que, avant 6 ans et sans intervention pédagogique spécifique, les enfants ne réussissent pas la tâche de conservation du nombre lorsque la présentation visuelle des items est incongruente avec le nombre d'items, et qu'apprendre à inhiber la stratégie trompeuse « longueur = nombre » (*i.e.* intervention exécutive) apporte de meilleurs bénéfices chez les élèves de 4 à 6 ans qu'un simple rappel de la règle à suivre (*i.e.* intervention contrôle) pour réussir la tâche de conservation du nombre, que ce soit immédiatement après l'intervention, mais aussi cinq jours après celle-ci. Les études

précédentes ayant été faites chez des adultes (Moutier et al., 2002) et des enfants lecteurs (Moutier & Houdé, 2003; étude 3), ce résultat permet donc de montrer que cet entrainement spécifique est adaptable à des élèves de maternelles, non lecteurs.

De plus, par le biais de la seconde expérimentation, nous avons pu montrer que les bénéfices de l'intervention exécutive étaient également présents lorsqu'elle était conduite par l'enseignant, dans sa propre classe, avec un petit groupe d'élèves. Comme dans l'étude 3, nous avons donc pu montrer la validité écologique de cette intervention pédagogique, mais cette fois avec des élèves de maternelles, qui sont non-lecteurs.

Ce dernier résultat met donc en avant qu'il est possible de faire de la recherche participative avec des enseignants de maternelle. Cela demande cependant une adaptation, et notamment une évaluation compatible à une passation non-individuelle. Il serait donc intéressant de mener des études supplémentaires permettant soit de tester une nouvelle façon d'évaluer les élèves de maternelles, soit de mesurer les effets de cette spécificité. Ainsi, nous pourrions proposer de nouveaux entrainements spécifiques dont l'objectif est d'apprendre aux élèves à surmonter leurs erreurs systématiques dues à une heuristique trompeuse.

INNOVATIONS PÉDAGOGIQUES ET MÉDIATION SCIENTIFIQUE

Les découvertes de cette thèse et plus généralement la présence d'une doctorante en sciences cognitives dans les bureaux de Nathan, ont permis la création de produits éditoriaux innovants, ainsi qu'une médiation scientifique auprès des équipes, mais aussi des enseignants. Nous avons pour cela créé une nouvelle collection d'ouvrages et de matériel éducatif chez les éditions Nathan intitulée « Du labo à la classe ». Cette collection regroupe des ouvrages qui font le lien entre la recherche en sciences cognitives et l'école. Elle propose des activités pour entrainer le cerveau des élèves et les aider à mieux comprendre son fonctionnement. C'est donc une collection qui permet d'enrichir les connaissances théoriques des enseignants quant au fonctionnement du cerveau de leurs élèves, tout en leur proposant des pistes pédagogiques concrètes à mettre en place dans leur classe.

Dans un premier temps, les travaux de cette thèse ont permis l'élaboration en Juin 2020 de deux coffrets titrés *Entrainer le cerveau à résister*, l'un pour les élèves non-lecteurs (*i.e.* de la PS au CP), l'autre pour les élèves lecteurs (*i.e.* du CP au CM2) (*cf.* Annexes 16 et 17). Ces coffrets sont composés d'un guide pédagogique co-écrit avec Julien Garbarg-Chenon, conseiller pédagogique à l'académie de Paris, dont le rôle tout au long de cette thèse était la pédagogisation des aspects scientifiques à destination des enseignants. Ces guides pédagogiques, composés de plusieurs parties, posent le contour d'une véritable pédagogie du CI, adaptée à l'âge des élèves. Après une introduction théorique réservée aux enseignants pour saisir le contexte théorique et les principes pédagogiques de l'ouvrage, ce dernier se décline en trois parties. Dans la première partie « A la découverte de mon cerveau », nous proposons des séances pédagogiques permettant de découvrir le cerveau avec ses différentes fonctions, et plus particulièrement le principe du CI. Dans ces séances pédagogiques clé en mai, les enfants découvrent trois personnages, Heuristique, Algorithme et Capitaine Inhibition, qui les suivront tout au long de l'année scolaire. Dans la deuxième partie de l'ouvrage, « Champion de l'inhibition », nous proposons un entrainement général au CI à mettre en place de façon

régulière en classe (*i.e.* 4 séances de 10 minutes par semaine) en inscrivant ces activités dans la routine de la classe. Cette partie est donc la mise en place pédagogique des découvertes de l'étude 1 de cette thèse. Ces 35 activités d'entrainement entraînent les trois composantes du CI (*i.e.* le CI de l'attention, l'inhibition cognitive et le contrôle de soi) et ont toutes été construites sur le même principe : une séance d'introduction permettant aux élèves de s'approprier les différents principes et le matériel éventuel de l'activité, des séances d'entraînement avec des recommandations pour l'enseignant quant à l'attitude à adopter (*e.g.* « encourager les élèves à jouer le plus vite possible, en essayant de ne pas se tromper »), des pistes pour faire évoluer le jeu et donc augmenter sa difficulté au cours de l'entrainement et enfin une étape métacognitive permettant d'analyser l'activité grâce aux trois personnages. Dans cette analyse, il s'agit d'identifier l'heuristique en jeu, le piège à inhiber et l'algorithme à mettre en place pour réussir l'activité. On invite ensuite les élèves à trouver d'autres situations, quotidiennes ou scolaires, où l'inhibition de ce type de piège est requise. Enfin, la troisième et dernière partie de cet ouvrage, intitulée « La chasse aux pièges », met en application les découvertes des études 2, 3 et 4 de cette thèse. Dans un premier temps, on propose aux enseignants une chasse aux pièges dans leur classe afin de repérer les différentes erreurs systématiques que commettent les élèves. Dans un second temps, on propose un entrainement spécifique au CI autour des heuristiques identifiées, en utilisant un Attrape-pièges. Il s'agit donc, dans cette partie, de proposer des interventions exécutives aux élèves ayant besoin de surmonter une erreur systématique. Dans la version coffret, ce guide pédagogique est accompagné d'un poster à afficher en classe mettant en scène les trois personnages dans une course à la bonne réponse (*cf.* Annexe 18), de cartes de jeux pour entrainer de façon générale le CI des enfants et d'attrape-pièges permettant de mettre en place l'entrainement spécifique au CI autour de différentes heuristiques.

Ces coffrets *Entrainer le cerveau à résister*, en version non-lecteurs et lecteurs, sont donc le résultat pédagogique des multiples découvertes de cette thèse. Nous apportons donc aux

enseignants les connaissances théoriques ainsi que les outils nécessaires à la mise en place de cette pédagogie du CI, dans leur classe.

Dans un second temps, la collaboration entre Nathan et le LaPsyDÉ (et plus particulièrement Olivier Houdé et Grégoire Borst) a permis d'enrichir la collection « Du labo à la classe, en éditant la gamme de jeux Flexigame permettant d'entrainer le CI et la flexibilité cognitive des enfants, et ce, dès la maternelle. Cette gamme entraînant les enfants résister à des automatismes se décline en trois jeux : Animaux & Tailles, Fruits, Légumes & Couleurs, et Formes & Couleurs (*cf.* Annexe 19). Pour rendre l'entrainement plus efficient, chaque jeu comporte plusieurs séries dont la difficulté évolue progressivement. Ainsi, les premières séries mettent en place des automatismes de pensée (*e.g.* mettre en correspondance des animaux et leur taille, associer des fruits et des légumes à leur couleur, reproduire un alignement de perles). Les séries suivantes, au contraire, vont demander aux enfants de résister à certains automatismes ou pensées trop rapides, de manière à activer un raisonnement logique permettant de trouver la bonne réponse (*e.g.* inhiber la taille de présentation d'une vache pour l'associer à sa taille réelle, inhiber la couleur de présentation d'un fruit ou d'un légume pour l'associer à sa couleur réelle, inhiber son envie de reproduire une série de perles à l'identique pour choisir des perles dont la couleur et la forme diffèrent). Au cours, ou à la fin, de chaque séance de jeu une analyse métacognitive est proposée aux enfants dans le but de les faire se questionner sur les différents mécanismes mis en jeu dans l'activité (*e.g.* « Quand je joue à ce jeu, mon cerveau à envie de… Mais mon cerveau peut se tromper car il y a un piège… Alors je peux entraîner mon cerveau à… »).

La valeur ajoutée de ces jeux, outre le fait qu'ils reposent sur des données neuroscientifiques, est qu'au cours de leur fabrication, les enseignants de Lea.fr ont pu les tester en classe, avec leurs élèves. Ainsi, grâce à leurs retours qualitatifs, nous avons pu améliorer les jeux en modifiant par exemple des items peu connus des élèves, des couleurs n'étant pas assez

tranchées, ou encore des consignes trop complexes. De plus, dans l'idée de valider scientifiquement ces jeux comme étant « bons pour le cerveau », nous avons souhaité évaluer l'impact qu'ils pouvaient avoir sur une tâche de Stroop Animaux. Dans cette tâche on présente aux élèves une chimère dont le corps et la tête représentent deux animaux différents (*e.g.* une tête de vache sur un corps de mouton) et on leur demande de nommer l'animal dont le corps est représenté (*i.e.* « mouton »). Les enfants doivent donc inhiber leur réponse automatique qui est de dénommer un animal par sa tête. Pour cela, nous avons proposé à 24 enseignants de la PS au CP d'évaluer les compétences de CI de leurs élèves avant et après 4 semaines d'utilisation de ces trois jeux. Malheureusement notre adaptation papier-crayon de la tâche de Stroop Animal n'était pas suffisamment aboutie pour une passation de classe. Les résultats obtenus n'étaient pas exploitables. Néanmoins, le principe d'une telle évaluation est intéressant et à poursuivre.

Pour finir, la réalisation de cette thèse chez les Editions Nathan a permis d'apporter des conseils scientifiques aux différentes équipes, mais aussi une validation et une expertise scientifique sur plusieurs produits. Ainsi, nous avons édité en janvier 2021 *Comment apprend le cerveau ?* (Leleu-Galland & Gallois, 2021), un ouvrage de pédagogie apportant les réponses d'experts en neurosciences et sciences cognitives, ainsi que des conseils pédagogiques, autour du cerveau qui apprend. Le format de cet ouvrage, à lire en 90 minutes, est un bel exemple de médiation scientifique. Enfin, deux cahiers d'activités seront édités au début de l'été 2021 *J'apprends mieux en maternelle* et *J'apprends mieux en primaire* avec 75 activités pour l'un et 60 activités pour l'autre, de façon à renforcer le CI, la MdT et la flexibilité cognitive des enfants, à la maison (Pobelle & Roux, 2021a, 2021b).

DISCUSSION GÉNÉRALE

L'objectif principal de cette thèse était de rapprocher le monde de la recherche et celui de l'éducation en proposant aux enseignants du primaire de participer à des projets de recherche participative autour du CI de leurs élèves. Pour cela, nous avons collaboré avec des enseignants venant de toute la francophonie, la plupart ayant été recruté via la plateforme numérique et collaborative Lea.fr, pour qu'ils puissent co-construire et exécuter eux-mêmes, dans leur classe, des interventions pédagogiques auprès de leurs élèves.

L'enjeu majeur de cette thèse était de créer un lien entre chercheurs et enseignants en se focalisant sur des situations concrètes venant directement des salles de classe. A cet égard, nous nous sommes concentrés sur le CI, et comment le renforcer au service des apprentissages scolaires. Cette FE permettant de bloquer un automatisme ou une stratégie intuitive trompeur pour une tâche donnée, a montré son rôle essentiel dans le développement cognitif (Borst, Aïte, et al., 2015; Houdé, 2000, 2019b) et plus particulièrement dans l'acquisition de compétences scolaires (Houdé & Borst, 2015). Au quotidien, nous utilisons des stratégies de pensée rapides et automatiques qui s'avèrent parfois trompeuses. Ces erreurs systématiques ne seraient pas un manque de compétences, comme le pensait Piaget, mais plutôt un manque d'inhibition d'une stratégie heuristique. Ainsi, le CI a montré son rôle clé dans les quatre fondamentaux définis par l'Education nationale : lire et écrire (Ahr et al., 2016), compter (Rossi et al., 2019), penser ou raisonner (Houdé, 2000; Perret et al., 2003) et respecter autrui (Aïte et al., 2016).

Ainsi, plusieurs études ont cherché à développer des interventions permettant de renforcer cette fonction exécutive dans un contexte scolaire (*e.g.* Diamond, Barnett, Thomas, & Munro, 2007; Zhao, Chen, Fu, & Maes, 2015). Néanmoins, s'il arrive parfois que les enseignants soient impliqués dans la réalisation de la recherche (Diamond et al., 2007), il n'existait, à notre connaissance, aucune étude ayant impliqué des enseignants en tant qu'acteurs principaux d'une recherche participative, alors même que ce mode de recherche a permis, dans de nombreux autres domaines scientifiques, de montrer son intérêt. En effet, que ce soit dans

les domaines des sciences naturelles et médicales ou des sciences humaines et sociales, la recherche participative permet de rapprocher les chercheurs et les non-chercheurs, mais aussi d'enrichir la culture scientifique des non-chercheurs (Bonney et al., 2015). Dans le domaine de l'éducation, la création d'un lien entre chercheurs et enseignants permettrait également de prévenir la diffusion de fausses connaissances au sein de la communauté enseignante qui contribuent à la diffusion de neuromythes (Howard-Jones, 2014). Ainsi, on comprend aisément l'intérêt de faire de la recherche participative avec des enseignants en les impliquant dans les différentes phrases d'un projet de recherche.

Dans ce contexte théorique, cette thèse avait donc pour vocation de répondre à trois objectifs. Le premier était de prouver qu'une recherche participative en classe, où les enseignants étaient les seuls intervenants, permettait d'entrainer le CI d'enfants d'âge scolaire (Etude 1). Ensuite, le deuxième objectif de cette thèse était, par le biais des enseignants en classe, d'identifier de nouvelles heuristiques scolaires, ainsi que leur période de développement (Etude 2). Enfin, le troisième et dernier objectif de cette thèse était de montrer qu'un entrainement spécifique du CI, mené par l'enseignant dans sa classe, pouvait aider les enfants à surmonter leurs erreurs systématiques dans la résolution de problèmes arithmétiques à contenus verbaux (Etude 3) et dans la tâche piagétienne classique de conservation du nombre (Etude 4).

Les résultats de la première étude ont montré qu'un entrainement général de cinq semaines composé d'activités scolaires et mené par des enseignants permettait de renforcer le CI d'enfants d'âge scolaire, mais ont aussi prouvé qu'un projet de recherche participative adoptant une méthodologie expérimentale pouvait fournir des résultats significatifs. Cette étude, en étant la première à notre connaissance, nous a permis de valider une méthodologie expérimentale adaptée aux conditions d'une classe. Cela passait par différentes étapes. La première fut la création d'une équipe pluridisciplinaire pouvant faire le lien entre le monde de

la recherche et celui de l'éducation. La deuxième était la formation des enseignants, à distance, aux aspects théoriques et méthodologiques de la recherche expérimentale. La troisième étape était l'adaptation d'un test expérimental mesurant le CI afin que ce dernier puisse être réalisé en version papier-crayon et en groupe. Enfin, la quatrième et dernière étape était l'élaboration d'activités d'entrainement pouvant être réalisées en groupe, dans une salle de classe ou une cour de récréation.

La validation de cette méthodologie et d'un effet d'un entrainement général sur le CI des enfants d'âge scolaire nous a ensuite permis d'envisager de nouvelles études. Il s'agissait pour nous de réutiliser cette méthodologie en l'adaptant à un entrainement spécifique du CI, ciblé autour d'une heuristique ciblée. Pour cela nous avons mené l'étude 2 afin de mieux connaître le terrain d'expérimentation, ainsi que ses besoins. Nous souhaitions connaître les erreurs systématiques que commettent les élèves en classe, et établir une période de développement pour chacune d'elles. Après avoir sélectionné huit heuristiques observées en classe par les enseignants du CE1 au CM2, nous avons étudié les performances des élèves de ces différents niveaux à des items congruents et incongruents. Il s'agissait d'établir la période sensible de chacune des heuristiques, c'est-à-dire la période la plus adaptée pour proposer une intervention pédagogique ciblée sur cette heuristique. Les résultats de l'étude ont permis de montrer qu'en mathématiques, le CM1 était le niveau le plus adéquat pour entrainer l'inhibition du biais du nombre entier et du biais visuo-spatial présents dans la tâche de comparaison de nombres décimaux. En ce qui concerne la comparaison de fractions où le biais du nombre entier induit également les enfants en erreur, la période sensible pour l'aborder serait le CM2. L'heuristique « quand je multiplie je rajoute un 0 » présente dans la tâche de multiplication par 10 serait dans sa période sensible pour une intervention pédagogique en CM1 et CM2. Les résultats de l'étude ont mis en avant que les niveaux du CE1 et CE2 étaient idéaux pour proposer une intervention pédagogique ciblée autour de l'inhibition de l'heuristique « toujours soustraire

le plus petit chiffre au plus grand », dans une tâche de soustraction avec retenue. Nous avons également montré que les CM1 étaient dans la période sensible pour recevoir une intervention pédagogique adaptée autour de l'heuristique « le chiffre des unités est le dernier chiffre du nombre ». Enfin, l'étude a révélé que les élèves de CE1 et CE2 seraient dans la période sensible permettant de proposer une intervention pédagogique adaptée autour de l'heuristique « additionner si plus, soustraire si moins », présente dans la résolution de problèmes arithmétiques à contenus verbaux. En français, concernant les heuristiques « après les je mets un s » et « après vous je mets ez », la période la plus adaptée pour une intervention pédagogique serait le CM2. Ensuite, notre étude a pu montrer que les élèves de CM1 et CM2 étaient les plus à même de faire des erreurs heuristiques lorsqu'ils doivent accorder un verbe avec un sujet singulier représentant une entité plurielle (*e.g.* toute l'équipe gagne).

Cette seconde étude nous a donc permis d'envisager la création d'entrainements spécifiques au CI ciblés sur une heuristique particulière, adaptés aux besoins des enfants. C'est dans cet esprit que nous avons mené les études 3 et 4 qui visaient à évaluer les effets d'un entrainement exécutif sur la résolution de problèmes arithmétiques à contenus verbaux (Etude 3) et la tâche piagétienne de conservation du nombre (Etude 4) où l'inhibition d'une heuristique précise est parfois requise pour réussir la tâche. Nous avons proposé ces deux entrainements selon deux formats : l'un en recherche expérimentale classique où le chercheur évaluait et entrainait les enfants individuellement, et l'autre en recherche participative où les enseignants évaluaient et entrainaient les enfants en groupe. Les résultats de l'étude 3 ont montré qu'entrainer les enfants de 7 à 10 ans à inhiber l'heuristique « additionner si plus, soustraire si moins » accompagné d'un rappel de la règle logique à suivre leur permettait ensuite de progresser dans la résolution de problèmes arithmétiques à contenus verbaux, alors qu'un simple rappel de la règle n'avait pas d'effet sur les performances des élèves. Ensuite, l'étude 4 a permis de montrer que cet entrainement exécutif était adaptable à la tâche piagétienne de

conservation du nombre chez des élèves de maternelle. En effet, nous avons observé que même si un simple rappel de la règle permettait aux élèves de 4 à 6 ans de progresser dans la tâche de conservation du nombre, un entrainement à inhiber la stratégie trompeuse « longueur = nombre » était plus efficace. Ainsi, les études 3 et 4 ont permis de montrer les effets bénéfiques d'un entrainement spécifique au CI, immédiatement après l'entrainement mais aussi cinq jours après, et que ces derniers étaient adaptables à des conditions de classe avec, notamment, un entrainement en groupe mené par l'enseignant.

Les résultats obtenus dans cette thèse sont en accord avec les études précédentes mettant en avant le rôle essentiel du CI dans les apprentissages scolaires (Borst, Aïte, et al., 2015). Notre étude 2 a permis de découvrir huit erreurs systématiques que commettent les enfants en raison d'un manque d'inhibition, et nos études 3 et 4 ont permis de montrer qu'en entrainant de façon spécifique le CI, les élèves pouvaient ensuite être meilleurs dans des tâches scolaires et ne plus commettre ces erreurs heuristiques. Enfin, l'étude 1 a permis de montrer qu'il était possible d'entrainement le CI de façon générale, avec des activités de classe. Nos résultats significatifs ainsi que les retours qualitatifs des enseignants nous permettent désormais d'infirmer le constat selon lequel le fossé entre enseignants et chercheurs serait trop grand (Bowers, 2016). En montrant qu'il est possible de faire de la recherche participative, avec les enseignants, autour d'intérêts communs, nous nous rapprochons plutôt de l'idée selon laquelle la recherche participative serait un outil permettant de réduire la distance entre le monde de l'éducation et le monde de la recherche en sciences cognitives (Ansari et al., 2012; Houdé, 2021). Nos découvertes suggèrent donc que des transformations du système éducatif, mais aussi des pratiques pédagogiques sont possibles. Tout d'abord, il serait intéressant de connaître l'impact de cette acculturation scientifique sur les conceptions naïves des enseignants à propos du cerveau. En effet, des études précédentes ont montré qu'impliquer des enseignants dans une recherche participative permettrait de combattre la formation de neuromythes, des croyances à

propos du cerveau qui sont pour la plupart du temps des distorsions biaisées de faits scientifiques (Howard-Jones, 2014). De plus, la formation de ces neuromythes semble avoir des effets néfastes sur les pratiques éducatives (Dekker, Lee, Howard-Jones, & Jolles, 2012). Ainsi, il semble intéressant d'évaluer l'évolution des neuromythes des enseignants, qu'ils aient participé ou non à une recherche participative. Il s'agirait donc d'intégrer à nos futures études une évaluation des conceptions naïves des enseignants avant le début d'une recherche participative, et à sa conclusion. Pour cela nous pourrions évaluer trois groupes d'enseignants : un premier groupe qui participe avec sa classe à une recherche participative en tant que groupe expérimental, un deuxième groupe qui participe avec sa classe à une recherche participative en tant que groupe contrôle et enfin un troisième groupe qui ne participerait à aucune recherche participative et dont on réaliserait seulement une évaluation des conceptions naïves sur le cerveau. Pour cela, nous pourrions utiliser le questionnaire de 32 questions établi par Dekker, Lee, Howard-Jones et Jolles en 2012 (*e.g.* « Lorsque l'on dort, notre cerveau est inactif ») (Dekker et al., 2012).

De plus, dans l'idée de changer les pratiques pédagogiques, il serait nécessaire de commencer par faire évoluer la formation des enseignants, car ces derniers ne sont pas suffisamment préparés à comprendre et appliquer des découvertes scientifiques dans leur classe (Leibbrand & Watson, 2010). En effet, il est essentiel de former les enseignants aux FE, à leur rôle et à leurs implications dans les apprentissages scolaires (Pomerance, Greenberg, & Walsh, 2016). L'idée n'est pas là que les enseignants deviennent des scientifiques à la fin de leur formation initiale, mais plutôt d'accroître leur culture scientifique et leur donner les moyens d'utiliser ces connaissances dans leurs pratiques (Coch, 2018). Les enseignants pourraient alors faire évoluer leurs pratiques pédagogiques et intégrer, dans le quotidien de la classe, des entraînements au CI. En effet, nos recherches ayant montré qu'un entrainement, qu'il soit général ou spécifique, pouvait améliorer les performances des enfants lorsqu'il était dispensé

par des enseignants eux-mêmes avec des activités de classe menées en groupe, on peut alors considérer l'importance d'intégrer durablement ces activités d'entrainement au fonctionnement de la classe. Bien que nos études n'aient pas mesuré les effets de transfert des bénéfices de ces entrainements, des études précédentes ont permis de montrer qu'un entrainement au CI permettait d'améliorer durablement les performances scolaires (*e.g.* Johann & Karbach, 2019). Ainsi, on peut faire l'hypothèse que renforcer le CI des élèves, dans leur classe, avec des activités pleinement intégrées à la vie de classe, pourrait leur permettre de combattre leurs erreurs systématiques et ainsi améliorer leurs compétences scolaires. C'est dans cette optique, et à la suite des résultats présentés dans cette thèse, que nous avons construit et édité les coffrets *Entrainer le cerveau à résister* dont l'objectif est de fournir une pédagogie, clé en main, pour entrainer le CI des élèves de façon générale, mais aussi de façon spécifique autour d'heuristiques précédemment repérées dans les classes (Garbarg-Chenon & Letang, 2020; Letang & Garbarg-Chenon, 2020).

De façon plus générale, les découvertes de cette thèse nous ont permis de valider une méthodologie expérimentale, adaptée à la vie d'une classe où l'enseignant est le seul intervenant. Cette validation nous permet donc aujourd'hui d'envisager de nouveaux projets de recherche participative impliquant les enseignants dans la démarche de recherche. Pour commencer, dans l'intention de valider scientifiquement nos créations éditoriales, mais aussi les effets de transfert de ces dernières, nous souhaitons tester l'impact des coffrets non-lecteurs et lecteurs *Entrainer le cerveau à résister* (Garbarg-Chenon & Letang, 2020; Letang & Garbarg-Chenon, 2020) sur le CI des enfants de CP, CE2 et CM2, mais aussi les autres FE et les acquisitions scolaires. Pour cela, nous avons lancé en novembre dernier une nouvelle recherche participative réunissant 30 enseignants de chaque niveau (*i.e.* CP, CE2 et CM2) avec 20 classes expérimentales testant les coffrets *Entrainer le cerveau à résister* et 10 autres ne testant pas les coffrets. Contrairement aux différents entrainements proposés dans cette thèse,

nous avons fait le choix ici de ne pas diviser chaque classe en deux groupes. Il y a donc des classes expérimentales et des classes contrôles. Ce choix a été fait pour faciliter la mise en place de l'expérimentation. En effet, dans ces coffrets, nous proposons une pédagogie du CI, ce ne sont donc pas de simples activités à mettre en place, mais plutôt une démarche complète induisant une forte implication dans la classe. L'expérimentation se déroule en deux phases. La première teste « A la découverte de mon cerveau » présentant aux élèves leur cerveau et son rôle au quotidien, et la seconde teste « Champion de l'inhibition » proposant un entrainement au CI par le biais d'activités ludiques à faire en classe. Dans le but d'observer l'évolution des performances des élèves au cours de l'expérimentation, trois évaluations ont été créées : le pré-test (*i.e.* avant le début de l'expérimentation), l'évaluation intermédiaire (*i.e.* entre les deux parties) et le post-test (*i.e.* à la fin de l'expérimentation). Pour chaque évaluation, nous avons construit des livrets d'évaluation papier-crayon, composés de six exercices à réaliser en groupe classe. Pour évaluer les effets de transfert proche, les élèves de CP ont réalisé un test de Stroop Animal (pour non-lecteurs) et de Stroop Numérique, tandis que les élèves de CE2 et CM2 ont réalisé un test de Stroop couleur (pour lecteurs) et de Stroop Numérique. Ensuite, afin d'étudier les effets de transfert lointain, nous avons mesuré les compétences des élèves en flexibilité cognitive en utilisant une adaptation papier-crayon du Trail Making Test, en mémoire de travail par une adaptation papier-crayon de la tâche d'empan de chiffres, et en littéracie et mathématiques par des évaluations adaptées aux différents niveaux des élèves. Nous espérons, par le biais de cette expérimentation, pouvoir montrer scientifiquement l'impact des coffrets *Entrainement le cerveau à résister*, ainsi que les potentiels transferts proches et lointains.

Dans la continuité de cette thèse, nous souhaitons désormais proposer des projets de recherche participative autour des sciences cognitives aux enseignants du collège. Dans un premier temps, nous souhaitons mettre à contribution l'observation des enseignants afin de repérer les différentes heuristiques qu'ils observent dans leurs salles de classe. Nous pourrons

ainsi reproduire l'étude 2 de cette thèse avec de nouvelles heuristiques adaptées à de nouveaux niveaux de classe. Dans un second temps, nous souhaitons impliquer les enseignants dans une recherche participative autour de la métacognition. En effet, des études précédentes ayant montré le bénéfice de la métacognition sur les apprentissages scolaires (de Boer, Donker, Kostons, & van der Werf, 2018; Proust, 2018) nous souhaitons mettre en place une recherche proposant aux enseignants du collège six séances pédagogiques adaptées aux élèves de la 6ème à la 3ème, ayant pour intitulé « Apprendre à apprendre : comment fonctionne mon cerveau ? ». Il s'agit, dans ce projet, d'enseigner aux élèves le fonctionnement de leur « organe de la pensée » qu'ils utilisent tous les jours, tout comme ils connaissent déjà très bien le fonctionnement de leur système digestif ou de leurs poumons. Pour cela, nous avons constitué une équipe pluridisciplinaire composée de chercheurs du LaPsyDÉ et de deux enseignants en collège et auteurs chez Nathan, l'une professeure de littérature, l'autre professeur de mathématiques, tous deux titulaires du DU Neuroéducation de Université de Paris créé par le LaPsyDÉ. Cette collaboration a abouti à la création de six séances pédagogiques de 30 à 40 minutes « prêtes à enseigner » sur l'anatomie et les fonctions principales du cerveau, la plasticité cérébrale, l'attention, les mémoires, le CI et le rôle des émotions (*cf.* Annexe 20). Elles sont composées de questionnements individuels et/ou collectifs sur le thème abordé, d'apports théoriques sous différentes formes (*e.g.* vidéos, schémas, paroles d'enseignants) en alternance avec une mise en activité des élèves, ainsi que des recommandations concrètes pour réutiliser ces nouvelles connaissances dans leur quotidien, leurs apprentissages. Afin de connaître l'impact de cette intervention métacognitive, nous réaliserons trois évaluations : un pré-test deux semaines avant le début de l'expérimentation, un post-test immédiat une semaine après la dernière séance et un post-test différé après deux semaines de vacances scolaires. Ces trois évaluations questionnent les conceptions naïves des élèves sur l'intelligence (*e.g.* « Il faut beaucoup travailler pour être intelligent ») (Da Fonseca et al., 2007) et le cerveau (*e.g.* « Quand

nous dormons notre cerveau est inactif. ») (Dekker et al., 2012). Comme dans l'étude présentée précédemment, la durée des séances et l'implication pour la classe ne nous permettent pas de diviser chaque classe en deux groupes. Nous avons donc demandé à chaque enseignant de mener l'expérimentation au sein de deux classes : l'une recevant les six séances pédagogiques, et l'autre étant classe contrôle non-active. Ainsi, près de 200 enseignants se sont inscrits à cette expérimentation, ce qui correspond à plus de 8000 élèves de la 6ème à la 3ème (*i.e.* la moitié d'entre eux recevra les six séances pédagogiques alors que l'autre moitié sera contrôle non-actif).

L'ensemble cette thèse CIFRE reposait sur la collaboration entre les éditions Nathan et le LaPsyDÉ. Au fil des mois, cette collaboration a permis aux Editions Nathan d'évoluer dans leur vision et a permis une prise de conscience des implications du cerveau et des fonctions exécutives dans les apprentissages. Cette acculturation a eu, pour toutes les équipes de Nathan, une répercussion que ce soit dans la façon de penser les nouveaux ouvrages, de créer de nouveaux projets ou de former les auteurs autour des sciences cognitives et de la démarche expérimentale. Ainsi, nous découvrons désormais des ouvrages parascolaires permettant de renforcer les FE des élèves d'âge préscolaire et scolaire (*e.g. J'apprends mieux en maternelle* et *J'apprends mieux en primaire*), des ouvrages jeunesses présentant le cerveau aux enfants (*e.g. Mon cerveau, Questions/réponses*), du matériel éducatif incluant une réflexion métacognitive (*e.g.* la gamme « Flexigame »), des manuels scolaires intégrant des fiches méthodes « Apprendre à apprendre » (*e.g.* la collection « Mon cahier d'activités ») ou encore des ouvrages de pédagogie permettant d'informer les enseignants sur les dernières découvertes neuroscientifiques et leurs implications en classe (*e.g. Le cerveau et les apprentissages*).

Au fil des mois, et maintenant des années, la collaboration Nathan – LaPsyDÉ, et plus particulièrement Lea.fr – LaPsyDÉ, s'est renforcée et enrichie, ce qui a permis au laboratoire de faire des nouvelles découvertes scientifiques sur le terrain des écoles (dans la grande tradition

initiée jadis par Alfred Binet au laboratoire de la Sorbonne) et aux Editions Nathan d'évoluer dans leur vision pour aujourd'hui envisager la création d'un pôle de recherche et développement, autour des sciences cognitives et du cerveau, au sein de l'entreprise. Dans un premier temps, cela a permis aux auteurs et éditrices du département de pédagogie d'approfondir leurs connaissances dans les différents domaines de la neuropédagogie, au regard des différentes découvertes en sciences cognitives et neurosciences. Cela a donc modifié la façon de créer les ouvrages, pour que ces derniers soient plus en adéquation avec ce que nous connaissons aujourd'hui du cerveau qui apprend. Dans un second temps, cette thèse a permis une réorganisation de Lea.fr, et de son équipe. Initialement, Lea.fr était composé de trois pôles, décrit dans l'introduction théorique de cette thèse (formation et information, aide à la préparation et l'animation de la classe et le Lab' d'innovation pédagogique). Aujourd'hui la réflexion est lancée pour que le Lab' d'innovation pédagogique devienne le cœur innovant de Lea.fr. De cette façon, nous pourrions créer un véritable pôle de recherche et développement avec une équipe de chercheurs permettant de multiplier les collaborations. Nous avons ainsi pour projet de tester scientifiquement nos méthodologies pédagogiques, de multiplier les recherches participatives en sciences cognitives avec le LaPsyDÉ, mais aussi d'en développer de nouvelles dans les domaines du numérique et de la co-éducation (parents-enseignants-élèves), par exemple, par le biais de nouvelles collaborations avec des laboratoires de recherche, mais aussi des Start-Ups.

En conclusion, cette thèse confirme l'intérêt d'impliquer des enseignants dans des projets de recherche participative en tant que co-chercheurs. Ces derniers peuvent contribuer à la recherche appliquée en entrainant le CI de leurs élèves ou encore en décelant les erreurs systématiques que ces derniers font. Cela permet ensuite d'en définir les périodes de développement et de proposer des interventions pédagogiques adaptées. L'ensemble de ces études permet de valider une méthodologie expérimentale de terrain pouvant s'adapter aux

élèves de 4 à 12 ans. Cette même méthodologie permet de rapprocher les enseignants et les chercheurs et ainsi accroître la culture scientifique des non-chercheurs dans l'objectif qu'ils puissent utiliser leurs nouvelles connaissances dans leurs pratiques pédagogiques. Enfin, cette thèse a permis de montrer qu'une collaboration entre un laboratoire de recherche fondamentale et une maison d'édition scolaire pouvait avoir un fort impact sur la recherche appliquée, sur l'entreprise elle-même, mais aussi et surtout dans le monde de l'éducation. De cette façon, les enseignants adhérents profondément et activement aux sciences cognitives, plutôt que de les voir imposées d'en haut.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Ahr, E., Houdé, O., & Borst, G. (2016). Inhibition of the mirror generalization process in reading in school-aged children. *Journal of Experimental Child Psychology*, *145*, 157–165. https://doi.org/10.1016/j.jecp.2015.12.009

Ahr, E., Houdé, O., & Borst, G. (2017). Predominance of lateral over vertical mirror errors in reading: A case for neuronal recycling and inhibition. *Brain and Cognition*, *116*, 1–8. https://doi.org/10.1016/j.bandc.2017.03.005

Aïte, A., Berthoz, A., Vidal, J., Roell, M., Zaoui, M., Houdé, O., & Borst, G. (2016). Taking a Third-Person Perspective Requires Inhibitory Control: Evidence From a Developmental Negative Priming Study. *Child Development*, *00*(0), 1–16. https://doi.org/10.1111/cdev.12558

Alibali, M. W., & Nathan, M. J. (2010). Conducting research in schools: A practical guide. *Journal of Cognition and Development*, *11*(4), 397–407. https://doi.org/10.1080/15248372.2010.516417

Allan, N. P., Hume, L. E., Allan, D. M., Farrington, A. L., & Lonigan, C. J. (2014). Relations Between Inhibitory Control and the Development of Academic Skills in Preschool and Kindergarten : A Meta-Analysis, *50*(10), 2368–2379.

Amso, D., & Johnson, S. P. (2005). Selection and inhibition in infancy: Evidence from the spatial negative priming paradigm. *Cognition*, *95*(2). https://doi.org/10.1016/j.cognition.2004.08.006

Anadon, M. (2013). Recherche participative. In I. Casillo (Ed.), *Dictionnaire critique et interdisciplinaire de la participation*. Paris: GIS Déocratie et Participation.

Ansari, D., De Smedt, B., & Grabner, R. H. (2012). Neuroeducation - A critical overview of an emerging field. *Neuroethics*, *5*(2), 105–117. https://doi.org/10.1007/s12152-011-9119-3

Asingizwe, D., Murindahabi, M. M., Koenraadt, C. J. M., Poortvliet, P. M., van Vliet, A. J. H., Ingabire, C. M., … Leeuwis, C. (2019). Co-Designing a Citizen Science Program for Malaria Control in Rwanda. *Sustainability*, *11*, 1–17. https://doi.org/10.3390/su11247012

Aydmune, Y., Introzzi, I., & Lipina, S. (2019). Inhibitory Processes Training for School-age Children: Transfer Effects. *Developmental Neuropsychology*, *44*(7), 513–542. https://doi.org/10.1080/87565641.2019.1677667

Baddeley, A. D., & 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

Banerjee, A. V, Banerji, R., Duflo, E., Glennerster, R., & Khemani, S. (2010). Pitfalls of Participatory Programs : Evidence from a Randomized Evaluation in Education in India. *American Economic Journal: Economic Policy*, *2*(1), 1–30.

Baylis, G. C., & Driver, J. (2001). Perception of symmetry and repetition within and across visual shapes: Part-descriptions and object-based attention. *Visual Cognition*, *8*(2), 163–196. https://doi.org/10.1080/13506280042000126

Beauchamp, K. G., Kahn, L. E., & Berkman, E. T. (2016). Does inhibitory control training transfer?: Behavioral and neural effects on an untrained emotion regulation task. *Social Cognitive and Affective Neuroscience*, *11*(9), 1374–1382. https://doi.org/10.1093/scan/nsw061

Bergold, J., & Thomas, S. (2012). Participatory research methods: A methodological approach

in motion. *Historical Social Research*, *13*(1), 191–222. https://doi.org/10.17169/fqs-13.1.1801

Berthoz, A. (2013). *La vicariance : Le cerveau créateur de mondes*. Paris: Odile Jacob.

Best, J. R. (2010). Effects of physical activity on children's executive function: Contributions of experimental research on aerobic exercise. *Developmental Review*, *30*(4), 331–351. https://doi.org/10.1016/j.dr.2010.08.001

Best, J. R., & Miller, P. H. (2010). A Developmental Perspective on Executive Function. *Child Development*, *81*(6), 1641–1660.

Blair, C. B., & 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

Blanke, O., Mohr, C., Michel, C. M., Pascual-Leone, A., Brugger, P., Seeck, M., … Thut, G. (2005). Linking out-of-body experience and self processing to mental own-body imagery at the temporoparietal junction. *Journal of Neuroscience*, *25*(3), 550–557. https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.2612-04.2005

Bonney, R. (1996). Citizen science: A lab tradition. *Living Bird*, *15*(4), 7–15.

Bonney, R., Ballard, H. L., Jordan, R., McCallie, E., Phillips, T., Shirk, J., & Wilderman, C. . (2009). *Public Participation in Scientific Research: Defining the Field and Assessing Its Potential for Informal Science Education. A CAISE Inquiry Group Report*. Washington DC: Center for Advendement of Informal Science Education (CAISE).

Bonney, R., Cooper, C. B., Dickinson, J., Kelling, S., Phillips, T., Rosenberg, K. V., & Shirk, J. (2009). Citizen science: A developing tool for expanding science knowledge and scientific literacy. *BioScience*, *59*(11), 977–984. https://doi.org/10.1525/bio.2009.59.11.9

Bonney, R., Phillips, T. B., Ballard, H. L., & Enck, J. W. (2015). Can citizen science enhance public understanding of science? *Public Understanding of Science*, *25*(1), 1–15. https://doi.org/10.1177/0963662515607406

Bonney, R., Shirk, J. L., Phillips, T. B., Wiggins, A., Ballard, H. L., Miller-Rushing, A. J., & Parrish, J. K. (2014). Next steps for citizen science. *Science*, *343*(6178), 1436–1437. https://doi.org/10.1126/science.1251554

Boot, W. R., Simons, D. J., Stothart, C., & Stutts, C. (2013). The Pervasive Problem With Placebos in Psychology: Why Active Control Groups Are Not Sufficient to Rule Out Placebo Effects. *Perspectives on Psychological Science*, *8*(4), 445–454. https://doi.org/10.1177/1745691613491271

Borella, E., Carretti, B., & Pelegrina, S. (2010). The Specific Role of Inhibition in Reading Comprehension in Good and Poor Comprehenders. *Journal of Learning Disabilities*, *43*(6), 541–552. https://doi.org/10.1177/0022219410371676

Bornstein, M. H., Gross, C. G., & Wolf, J. Z. (1978). Perceptual similarity of mirror images in infancy. *Cognition*, *6*(2), 89–116. https://doi.org/10.1016/0010-0277(78)90017-3

Borst, G., Ahr, E., Roell, M., & Houdé, O. (2015). The cost of blocking the mirror generalization process in reading: evidence for the role of inhibitory control in discriminating letters with lateral mirror-image. *Psychonomic Bulletin & Review*, *22*(1), 228–234. https://doi.org/10.3758/s13423-014-0663-9

Borst, G., Aïte, A., & Houdé, O. (2015). Inhibition of misleading heuristics as a core mechanism for typical cognitive development: Evidence from behavioural and brain-imaging studies. *Developmental Medicine and Child Neurology*, *57*(s2), 21–25. https://doi.org/10.1111/dmcn.12688

Borst, G., Poirel, N., Pineau, A., Cassotti, M., & Houdé, O. (2012a). Inhibitory control efficiency in a piaget-like class-inclusion task in school-age children and adults: A developmental negative priming study. *Developmental Psychology*, *49*(7), 1366–1374. https://doi.org/10.1037/a0029622

Borst, G., Poirel, N., Pineau, A., Cassotti, M., & Houdé, O. (2012b). Inhibitory control in number-conservation and class-inclusion tasks: A neo-Piagetian inter-task priming study. *Cognitive Development*, *27*(3), 283–298. https://doi.org/10.1016/j.cogdev.2012.02.004

Borst, G., Poirel, N., Pineau, A., Cassotti, M., & Houdé, O. (2012c). Inhibitory control in number-conservation and class-inclusion tasks: A neo-Piagetian inter-task priming study. *Cognitive Development*, *27*, 283–298. https://doi.org/10.1016/j.cogdev.2012.02.004

Bowers, J. S. (2016). The practical and principled problems with educational neuroscience. *Psychological Review*, *123*(5), 600–612. https://doi.org/10.1037/rev0000025

Brault Foisy, L. M., Ahr, E., Masson, S., Houdé, O., & Borst, G. (2017). Is inhibitory control involved in discriminating pseudowords that contain the reversible letters b and d? *Journal of Experimental Child Psychology*, *162*, 259–267. https://doi.org/10.1016/j.jecp.2017.05.011

Bull, R., & Lee, K. (2014). Executive Functioning and Mathematics Achievement. *Child Development Perspectives*, *8*(1), 36–41. https://doi.org/10.1111/cdep.12059

Burgess, P. W., & Shallice, T. (1996). Response suppression, Initiation and strategy use following frontal lobe lesions. *Neuropsychologia*, *34*(4), 263–272. https://doi.org/10.1016/0028-3932(95)00104-2

Buttelmann, F., & Karbach, J. (2017). Development and plasticity of cognitive flexibility in early and middle childhood. *Frontiers in Psychology*, *8*, 1–6. https://doi.org/10.3389/fpsyg.2017.01040

Carlson, S. M., & Moses, L. J. (2001). Individual Differences in Inhibitory Control and Children's Theory of Mind. *Child Development*, *72*(4), 1032–1053. https://doi.org/10.1111/1467-8624.00333

Case, R. (1991). *The mind's straircase*. Hillsdale: Lawrence Erlbaum.

Casey, B. J., & Caudle, K. (2013). The Teenage Brain: Self Control. *Current Directions in Psychological Science*, *22*(2), 82–87. https://doi.org/10.1177/0963721413480170

Cassotti, M., & Moutier, S. (2010). How to explain receptivity to conjunction-fallacy inhibition training: Evidence from the Iowa Gambling Task. *Brain and Cognition*, *72*(3), 378–384. https://doi.org/10.1016/j.bandc.2009.11.004

Caviola, S., Mammarella, I. C., Pastore, M., & LeFevre, J. A. (2018). Children's strategy choices on complex subtraction problems: Individual differences and developmental changes. *Frontiers in Psychology*, *9*, 1–16. https://doi.org/10.3389/fpsyg.2018.01209

Coch, D. (2018). Reflections on Neuroscience in Teacher Education. *Peabody Journal of Education*, *93*(3), 309–319. https://doi.org/10.1080/0161956X.2018.1449925

Collins, A., & Koechlin, E. (2012). Reasoning, learning, and creativity: Frontal lobe function and human decision-making. *PLoS Biology*, *10*(3), 332–354. https://doi.org/10.1371/journal.pbio.1001293

Cornell, J. M. (1985). Spontaneous Mirror-Writing in Children. *Canadian Journal of Psychology*, *39*(1), 174–179.

Corsi, P. M. (1973). Human memory and the medial temporal region of the brain. *Dissertation Abstracts International*, *34*(2-B), 891.

Cragg, L., & Gilmore, C. (2014). Skills underlying mathematics: The role of executive function in the development of mathematics proficiency. *Trends in Neuroscience and Education*, *3*(2), 63–68. https://doi.org/10.1016/j.tine.2013.12.001

Cragg, L., Keeble, S., Richardson, S., Roome, H. E., & Gilmore, C. (2017). Direct and indirect influences of executive functions on mathematics achievement. *Cognition*, *162*, 12–26. https://doi.org/10.1016/j.cognition.2017.01.014

Cragg, L., & Nation, K. (2008). Go or no-go? Developmental improvements in the efficiency of response inhibition in mid-childhood. *Developmental Science*, *11*(6), 819–827. https://doi.org/10.1111/j.1467-7687.2008.00730.x

Crescentini, C., Fabbro, F., & Urgesi, C. (2014). Mental spatial transformations of objects and bodies: Different developmental trajectories in children from 7 to 11 years of age. *Developmental Psychology*, *50*(2), 370–383. https://doi.org/10.1037/a0033627

Crone, E. A., Wendelken, C., Donohue, S., van Leijenhorst, L., & Bunge, S. (2006). Neurocognitive development of the ability to manipulate information in working memory. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *103*, 9315–9320.

Da Fonseca, D., Schiano-Lomoriello, S., Cury, F., Poinso, F., Rufo, M., & Therme, P. (2007). Validité factorielle d'un questionnaire mesurant les théories implicites de l'intelligence (TIDI). *L'Encéphale*, *33*(4), 579–584. https://doi.org/10.1016/s0013-7006(07)92056-4

Daniel, D. B. (2012). Promising principles: Translating the science of learning to educational practice. *Journal of Applied Research in Memory and Cognition*, *1*(4), 251–253. https://doi.org/10.1016/j.jarmac.2012.10.004

Davidson, M. C., Amso, D., Anderson, L. C., & 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.

de Boer, H., Donker, A. S., Kostons, D. D. N. M., & van der Werf, G. P. C. (2018). Long-term effects of metacognitive strategy instruction on student academic performance: A meta-analysis. *Educational Research Review*, *24*, 98–115. https://doi.org/10.1016/j.edurev.2018.03.002

Dehaene, S., Nakamura, K., Jobert, A., Kuroki, C., Ogawa, S., & Cohen, L. (2010). Why do children make mirror errors in reading? Neural correlates of mirror invariance in the visual word form area. *NeuroImage*, *49*(2), 1837–1848. https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2009.09.024

Dekker, S., Lee, N. C., Howard-Jones, P. A., & Jolles, J. (2012). Neuromyths in education: Prevalence and predictors of misconceptions among teachers. *Frontiers in Psychology*, *3*, 1–8. https://doi.org/10.3389/fpsyg.2012.00429

Dempster, F. N. (1995). Interference and inhibition in cognition: an historical perspective. In A. Press (Ed.), *Interference and inhibition in cognition* (Dempster, pp. 3–26). New-York.

Desgagné, S. (1997). Le concept de recherche collaborative : l'idée d'un rapprochement entre chercheurs universitaires et praticiens enseignants. *Revue Des Sciences de l'éducation*, *23*(2), 371–393. https://doi.org/10.7202/031921ar

Desgagné, S., Bednarz, N., Lebuis, P., Poirier, L., & Couture, C. (2001). L'approche collaborative de recherche en éducation : un rapport nouveau à établir entre recherche et formation. *Revue Des Sciences de l'éducation*, *27*(1), 33–64.

Diamond, A. (1995). Evidence of robust recognition memory early in life even when assessed by reaching behavior. *Journal of Experimental Child Psychology*, *59*, 419–456.

Diamond, A. (2012). Activities and Programs That Improve Children's Executive Functions. *Current Directions in Psychological Science*, *21*(5), 335–341. https://doi.org/10.1177/0963721412453722

Diamond, A. (2013). Executive Functions. *Annu. Rev. Psychol*, *64*, 135–168. https://doi.org/10.1146/annurev-psych-113011-143750

Diamond, A., Barnett, W. S., Thomas, J., & Munro, S. (2007). Preschool Program Improves Cognitive Control. *Science*, *318*, 1387–1388. https://doi.org/10.1126/science.1151148

Diamond, A., & Lee, K. (2011). Interventions shown to aid executive function development in children 4 to 12 years old. *Science*, *333*(6045), 959–964. https://doi.org/10.1126/science.1204529

Diamond, A., & Ling, D. S. (2016). Conclusions about interventions, programs, and approaches for improving executive functions that appear justified and those that, despite much hype, do not. *Developmental Cognitive Neuroscience*, *18*, 34–48. https://doi.org/10.1016/j.dcn.2015.11.005

Diamond, A., & Taylor, C. (1996). Development of an aspect of executive control: Development of the abilities to remember what I said and to "do as I say, not as I do." *Developmental Psychobiology*, *29*(4), 315–334. https://doi.org/10.1002/(SICI)1098-2302(199605)29:4<315::AID-DEV2>3.0.CO;2-T

Doebel, S. (2020). Rethinking Executive Function and Its Development. *Perspectives on Psychological Science*, *15*(4), 942–956. https://doi.org/10.1177/1745691620904771

Doebel, S., & Zelazo, P. D. (2015). A meta-analysis of the Dimensional Change Card Sort: Implications for developmental theories and the measurement of executive function in children. *Developmental Review*, *38*(1), 241–268. https://doi.org/10.1016/j.dr.2015.09.001.A

Duncan, R. J., Schmitt, S. A., Burke, M., & McClelland, M. M. (2018). Combining a Kindergarten Readiness Summer Program with a Self-Regulation Intervention Improves School Readiness. *Early Childhood Research Quarterly*, *42*, 291–300.

Duraiappah, A., Atteveldt, N. Van, Asah, S., Borst, G., Bugden, S., & Buil, J. M. (2021). The International Science and Evidence-based Education Assessment. *Npj Science of Learning*, *6*. https://doi.org/10.1038/s41539-021-00085-9

Durkin, K., & Rittle-Johnson, B. (2015). Diagnosing misconceptions: Revealing changing decimal fraction knowledge. *Learning and Instruction*, *37*, 21–29.

https://doi.org/10.1016/j.learninstruc.2014.08.003

Enriquez-Geppert, S., Huster, R. J., & Herrmann, C. S. (2013). Boosting brain functions: Improving executive functions with behavioral training, neurostimulation, and neurofeedback. *International Journal of Psychophysiology*, *88*, 1–16. https://doi.org/10.1016/j.ijpsycho.2013.02.001

Espy, K. A., McDiarmid, M. M., Cwik, M. F., Meade Stalets, M., Hamby, A., & 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

Espy, K. A., McDiarmid, M. M., Cwik, M. F., Stalets, M. M., Hamby, A., & 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

Eustache, F., & Guillery-Girard, B. (2016). *La neuroéducation. La mémoire au coeur des apprentissages*. Paris: Odile Jacob.

Evans, J. S. B. T. (1972). Reasoning with negatives. *British Journal of Psychology*, *63*(2), 213–219.

Evans, J. S. B. T. (1989). *Biaises in human reasonning*. Hove and London: Lawrence Erlbaum.

Evans, J. S. B. T., Barston, J. L., & Pollard, P. (1983). On the conflict between logic and belief in syllogistic reasoning. *Memory & Cognition*, *11*(3), 295–306. https://doi.org/10.3758/BF03196976

Evans, J. S. B. T., & Perry, T. S. (1995). Belief bias in children's reasoning. *Current Psychology of Cognition*, *14*(1), 103–115.

Fan, N., Mueller, J. H., & Marini, A. E. (1994). Solving Difference Problems : Wording Primes Coordination Linked references are available on JSTOR for this article : Solving Difference Problems : Wording Primes Coordination. *Cognition and Instruction*, *12*(4), 355–369.

Faul, F., Erdfelder, E., Buchner, A., & Lang, A. G. (2009). Statistical power analyses using G*Power 3.1: Tests for correlation and regression analyses. *Behavior Research Methods*, *41*(4), 1149–1160. https://doi.org/10.3758/BRM.41.4.1149

Fayol, M., Hupet, M., & Largy, P. (1999). The acquisition of subject-verb agreement in written French: From novices to experts' errors. *Reading and Writing*, *11*(2), 153–174. https://doi.org/10.1023/A:1008038127807

Gandolfi, E., Traverso, L., Zanobini, M., Carmen, M., & Viterbori, P. (2021). The longitudial relotionship between early inhibitory control skills and emergent literacy in preschool children. *Reading and Writing*, 1–25. https://doi.org/10.1007/s11145-021-10131-y

Garbarg-Chenon, J., & Letang, M. (2020). *Entrainer le cerveau à résister. Coffret lecteurs*. Paris: Nathan.

Gardes, M.-L., & Prado, J. (2016). Entre neurosciences et éducation : des chainons manquants. *Les Cahiers Pédagogiques*, *527*, 35–38.

Gerstadt, C. L., Hong, Y. J., & Diamond, A. (1994). The relationship between cognition and action: performance of children 3 1/2-7 years old on a stroop-like day-night test.

Cognition, *53*(2), 129–153. https://doi.org/10.1016/0010-0277(94)90068-X

Ghodrati, S., Askari Nejad, M. S., Sharifian, M., & Nejati, V. (2019). Inhibitory control training in preschool children with typical development: an RCT study. *Early Child Development and Care*, 1–10. https://doi.org/10.1080/03004430.2019.1691544

Gordienko, Y. G. (2013). *Green Paper on Citizen Science: Citizen Science for Europe*. Socientize.

Gottlieb, J., Oudeyer, P.-Y., Lopes, M., & Baranes, A. (2013). Information seeking, curiosity and attention: computational and neural mechanisms. *Trends in Cognitive Sciences*, *17*(11), 585–593. https://doi.org/10.1016/j.tics.2013.09.001.Information

Gough, P., & Tunmer, W. (1986). Decoding, reading, and reading disability. *Remedial and Special Education*, *7*(1), 6–10.

Grant, D. A., & Berg, E. (1948). A behavioral analysis of degree of reinforcement and ease of shifting to new responses in a Weigl-type card-sorting problem. *Journal of Experimental Psychology*, *38*(4), 404–411. https://doi.org/10.1037/h0059831

Green, C. S., & Bavelier, D. (2008). Exercising Your Brain: A Review of Human Brain Plasticity and Training-Induced Learning. *Psychology and Aging*, *23*(4), 692–701. https://doi.org/10.1037/a0014345

Halford, G. S., & Fullerton, T. J. (1970). A Discrimination task which induces conservation of number. *Child Development*, *41*, 205–213.

Harnishfeger, K. K. (1995). The Development of Cognitive Inhibition. In *Interference and Inhibition in Cognition* (pp. 175–204). https://doi.org/10.1353/afa.2011.0074

Hodel, A. S. (2018). Rapid infant prefrontal cortex development and sensitivity to early environmental experience. *Developmental Review*, *48*, 113–144. https://doi.org/10.1016/j.dr.2018.02.003

Houben, K., Havermans, R. C., Nederkoorn, C., & Jansen, A. (2012). Beer à no-go: Learning to stop responding to alcohol cues reduces alcohol intake via reduced affective associations rather than increased response inhibition. *Addiction*, *107*(7), 1280–1287. https://doi.org/10.1111/j.1360-0443.2012.03827.x

Houdé, O. (1992). *Catégorisation et développement cognitif*. Paris: PUF.

Houdé, O. (1995). *Rationalité, développement et inhibition : Un nouveau cadre d'analyse*. Paris: PUF.

Houdé, O. (1997a). Numerical development: From the infant to the child. Wynn's (1992) paradigm in 2- and 3-year olds. *Cognitive Development*, *12*(3), 373–391. https://doi.org/10.1016/S0885-2014(97)90009-5

Houdé, O. (1997b). The problem of deductive competence and the inhibitory control of cognition. *Current Psychology of Cognition*, *16*(1–2), 108–113.

Houdé, O. (2000). Inhibition and cognitive development: object, number, categorization, and reasoning. *Cognitive Development*, *15*(1), 63–73. https://doi.org/10.1016/S0885-2014(00)00015-0

Houdé, O. (2007). First insights on "neuropedagogy of reasoning." *Thinking & Reasoning*, *13*(2), 81–89. https://doi.org/10.1080/13546780500450599

Houdé, O. (2019a). *3-System Theory of the Cognitive Brain: A Post-Piagetian Approach*. New-York and London: Routledge.

Houdé, O. (2019b). *L'intelligence humaine n'est pas un algorithme*. Paris: Odile Jacob.

Houdé, O. (2020a). *L'inhibition au service de l'intelligence : Penser contre soi-même*. Paris: Presses Universitaires de France.

Houdé, O. (2020b). *La psychologie de l'enfant* (9e edition). Paris: Presses Universitaires de France.

Houdé, O. (2021). *L'école du cerveau*. Paris: Le livre de Poche.

Houdé, O., & Borst, G. (2014). Measuring inhibitory control in children and adults: Brain imaging and mental chronometry. *Frontiers in Psychology*, *5*(JUN), 1–7. https://doi.org/10.3389/fpsyg.2014.00616

Houdé, O., & Borst, G. (2015). Evidence for an inhibitory-control theory of the reasoning brain. *Frontiers in Human Neuroscience*, *9*(March), 148. https://doi.org/10.3389/fnhum.2015.00148

Houdé, O., & Guichart, E. (2001). Negative priming effect after inhibition of numberalength interference in a Piaget-like task. *Developmental Science*, *4*(1), 119–123.

Houdé, O., & Moutier, S. (1996). Deductive reasoning and experimental inhibition training: The case of the matching bias. *Cahiers de Psychologie Cognitive/Current Psychology of Cognition*, *15*(4), 409–434.

Houdé, O., Pineau, A., Leroux, G., Poirel, N., Perchey, G., Lanoë, C., … Mazoyer, B. (2011). Functional magnetic resonance imaging study of Piaget's conservation-of-number task in preschool and school-age children: A neo-Piagetian approach. *Journal of Experimental Child Psychology*, *110*(3), 332–346. https://doi.org/10.1016/j.jecp.2011.04.008

Houdé, O., Zago, L., Mellet, E., Moutier, S., Pineau, A., Mazoyer, B., & Tzourio-mazoyer, N. (2000). Shifting from the Perceptual Brain to the Logical Brain : The Neural Impact of Cognitive Inhibition Training. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 721–728.

Howard-Jones, P. A. (2014). Neuroscience and education: Myths and messages. *Nature Reviews Neuroscience*, *15*(12), 817–824. https://doi.org/10.1038/nrn3817

Huizinga, M., & Van Der Molen, M. W. (2007). Age-group differences in set-switching and set-maintenance on the Wisconsin Card Sorting Task. *Developmental Neuropsychology*, *31*(2), 193–215. https://doi.org/10.1080/87565640701190817

Inhelder, B., & Piaget, J. (1955). *De la logique de l'enfant à la logique de l'adolescent*. Paris: Presses Universitaires de France.

Inhelder, B., & Piaget, J. (1964). *The early growth of logic in the child*. (R. and Kegan, Ed.). New-York.

Irwin, A. (1995). *Citizen science: A study if People, Expertise and Sustainable Development*. London: Routledge.

Johann, V., & Karbach, J. (2019). Effects of game-based and standard executive control training on cognitive and academic abilities in elementary school children. *Developmental Science*, *23*(4), 1–18. https://doi.org/10.1111/desc.12866

Johann, V., Könen, T., & Karbach, J. (2020). The unique contribution of working memory, inhibition, cognitive flexibility, and intelligence to reading comprehension and reading speed. *Child Neuropsychology*, *26*(3), 324–344. https://doi.org/10.1080/09297049.2019.1649381

Jolles, D. D., & Crone, E. A. (2012). Training the developing brain: A neurocognitive perspective. *Frontiers in Human Neuroscience*, *6*(MARCH 2012), 1–29. https://doi.org/10.3389/fnhum.2012.00076

Jordan, N. C., Hansen, N., Fuchs, L. S., Siegler, R., Gersten, R., & Micklos, D. (2013). Developmental predictors of fraction concepts and procedures. *Journal of Experimental Child Psychology*, *116*(1), 45–58. https://doi.org/10.1016/j.jecp.2013.02.001

Kahneman, D. (2011). *Thinking fast and slow*. London: Allen Lane.

Kail, R. (2002). Developmental change in proactive interference. *Child Development*, *73*(6), 1703–1714. https://doi.org/10.1111/1467-8624.00500

Karbach, J., & Unger, K. (2014). Executive control training from middle childhood to adolescence. *Frontiers in Psychology*, *5*, 1–14. https://doi.org/10.3389/fpsyg.2014.00390

Klauda, S. L., & Guthrie, J. T. (2008). Relationships of Three Components of Reading Fluency to Reading Comprehension. *Journal of Educational Psychology*, *100*(2), 310–321. https://doi.org/10.1037/0022-0663.100.2.310

Lagattuta, K. H., Sayfan, L., & Monsour, M. (2011). A new measure for assessing executive function across a wide age range: Children and adults find happy-sad more difficult than day-night. *Developmental Science*, *14*(3), 481–489. https://doi.org/10.1111/j.1467-7687.2010.00994.x

Lakes, K. D., & Hoyt, W. T. (2004). Promoting self-regulation through school-based martial arts training, *25*, 283–302. https://doi.org/10.1016/j.appdev.2004.04.002

Lanoë, C., Vidal, J., Lubin, A., Houdé, O., & Borst, G. (2016). Inhibitory control is needed to overcome written verb inflection errors: Evidence from a developmental negative priming study. *Cognitive Development*, *37*, 18–27. https://doi.org/10.1016/j.cogdev.2015.10.005

Largy, P., Dédéyan, A., & Hupet, M. (2004). Orthographic revision: A developmental study of how revisers check verbal agreements in written texts. *British Journal of Educational Psychology*, *74*(4), 533–550. https://doi.org/10.1348/0007099042376382

Lefrançois, R. (1997). La recherche collaborative : essai de définition 1. *Nouvelles Pratiques Sociales*, *10*(1), 81–95.

Leibbrand, J. A., & Watson, B. H. (2010). *NoThe road less traveled: How the developmental sciences can prepare educators to improve student achievement: Policy recommendations.* Washington DC: NationalCouncil forAccreditationofTeacher Education.

Leleu-Galland, E., & Gallois, J.-B. (2021). *Comment apprend le cerveau ?* Paris: Nathan.

Letang, M., & Garbarg-Chenon, J. (2020). *Entrainer le cerveau à résister. Coffret non-lecteurs*. Paris: Nathan.

Lewis, A. B., & Mayer, R. E. (1987). Students' Miscomprehension of Relational Statements in Arithmetic Word Problems. *Journal of Educational Psychology*, *79*(4), 363–371. https://doi.org/10.1037/0022-0663.79.4.363

Lieberman, A. (1986). Collaborative Research : Working With, Not Working On... *Educational Leadership*, *43*(5), 29–32.

Liu, Q., Zhu, X., Ziegler, A., & Shi, J. (2015). The effects of inhibitory control training for preschoolers on reasoning ability and neural activity. *Scientific Reports*, *5*(September), 1–10. https://doi.org/10.1038/srep14200

Lortie-Forgues, H., Tian, J., & Siegler, R. (2015). Why is learning fraction and decimal arithmetic so difficult? *Developmental Review*, *38*, 201–221. https://doi.org/10.1016/j.dr.2015.07.008

Lowman, M., D'Avanzo, C., & Brewer, C. (2009). Ecology: A national ecological network for research and education. *Science*, *323*(5918), 1172–1173. https://doi.org/10.1126/science.1166945

Lubin, A., Rossi, S., Lanoë, C., Vidal, J., Houdé, O., & Borst, G. (2016). Expertise, inhibitory control and arithmetic word problems: A negative priming study in mathematics experts. *Learning and Instruction*, *45*, 40–48. https://doi.org/10.1016/j.learninstruc.2016.06.004

Lubin, A., Vidal, J., Lanoë, C., Houdé, O., & Borst, G. (2013). Inhibitory control is needed for the resolution of arithmetic word problems: A developmental negative priming study. *Journal of Educational Psychology*, *105*(3), 701–708. https://doi.org/10.1037/a0032625

Luna, B., Garver, K. E., Urban, T. A., Lazar, N. A., & Sweeney, J. A. (2004). Maturation of cognitive processes from late childhood to adulthood. *Child Development*, *75*(5), 1357–1372. https://doi.org/10.1111/j.1467-8624.2004.00745.x

Lunt, L., Bramham, J., Morris, R. G., Bullock, P. R., Selway, R. P., Xenitidis, K., & David, A. S. (2012). Prefrontal cortex dysfunction and "Jumping to Conclusions": Bias or deficit? *Journal of Neuropsychology*, *6*(1), 65–78. https://doi.org/10.1111/j.1748-6653.2011.02005.x

Meert, G., Grégoire, J., & Noël, M.-P. (2009). Rational numbers: componential versus holistic representation of fractions in a magnitude comparison task. *Quarterly Journal of Experimental Psychology (2006)*, *62*(8), 1598–1616. https://doi.org/10.1080/17470210802511162

Miller-Rushing, A., Primack, R., & Bonney, R. (2012). The history of public participation in ecological research. *Frontiers in Ecology and the Environment*, *10*(6), 285–290. https://doi.org/10.1890/110278

Miyake, A., Friedman, N. P., Emerson, M. J., Witzki, A. H., Howerter, A., & Wager, T. D. (2000). The unity and diversity of executive functions and their contributions to complex "Frontal Lobe" tasks: a latent variable analysis. *Cognitive Psychology*, *41*(1), 49–100. https://doi.org/10.1006/cogp.1999.0734

Moffitt, T. E., Arseneault, L., Belsky, D., Dickson, N., Hancox, R. J., Harrington, H., … Caspi, A. (2011). A gradient of childhood self-control predicts health, wealth, and public safety. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *108*(7), 2693–2698. https://doi.org/10.1073/pnas.1010076108

Moreau, D., & Conway, A. R. A. (2014). The case for an ecological approach to cognitive training. *Trends in Cognitive Sciences*, *18*(7), 334–336. https://doi.org/10.1016/j.tics.2014.03.009

Morgan, P. L., Farkas, G., Hillemeier, M. M., Pun, W. H., & 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

Moutier, S. (2000). Deductive reasoning and experimental matching-bias inhibition training in school children. *Current Psychology of Cognition*, *19*, 429–452.

Moutier, S., Angeard, N., & Houdé, O. (2002). Deductive reasoning and matching-bias inhibition training: Evidence from a debiasing paradigm. *Thinking and Reasoning*, *8*(3), 205–224. https://doi.org/10.1080/13546780244000033

Moutier, S., & Houdé, O. (2003). Judgement under Uncertainty and Conjunction Fallacy Inhibition Training. *Thinking & Reasoning*, *9*(3), 185–201. https://doi.org/10.1080/13546780343000213

Moutier, S., Plagne-Cayeux, S., Melot, A. M., & Houdé, O. (2006). Syllogistic reasoning and belief-bias inhibition in school children: Evidence from a negative priming paradigm. *Developmental Science*, *9*(2), 166–172. https://doi.org/10.1111/j.1467-7687.2006.00476.x

Nelson, R. O., & Peoples, A. (1974). A Stimulus-response ananlysis of letter reversals. *Journal of Reading Behavior*, *7*, 329–340.

Ni, Y., & Zhou, Y.-D. (2005). Teaching and Learning Fraction and Rational Numbers: The Origins and Implications of Whole Number Bias, *40*(1), 27–52. https://doi.org/10.1207/s15326985ep4001_3

Nye, B., Konstantopoulos, S., & Hedges, L. V. (2004). How large are teacher effects? *Educational Evaluation and Policy Analysis*, *26*(3), 237–257. https://doi.org/10.3102/01623737026003237

OCDE. (2019). *Résultats du PISA 2018, savoirs et avoir-faire des élèves* (OCDE). Paris. https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004

Pascual-Leone, A. (2000). Mental Attention, Consciousness, and the Progressive Emergence of Wisdom. *Journal of Adult Development*, *7*(4), 241–254. https://doi.org/10.1023/A

Perner, J., & Lang, B. (2002). What causes 3-year-olds' difficulty on the dimensional change card sorting task? *Infant and Child Development*, *11*(2), 93–105.

Perret, P., Paour, J. L., & Blaye, A. (2003). Respective contributions of inhibition and knowledge levels in class inclusion development: A negative priming study. *Developmental Science*, *6*(3), 283–288. https://doi.org/10.1111/1467-7687.00284

Piaget, J. (1952). *The child's conception of number*. London: Routledge & Kegan Paul.

Piaget, J. (1954). *The construction of reality in child*. London: Routledge & Kegan Paul.

Piaget, J. (1984). Piaget's theory. In *Handbook of child psychology : Vol. 1. History, theory and methods* (pp. 103–128). New-York: Wiley.

Piaget, J., & Inhelder, B. (1948). *La représentation de l'espace chez l'enfant*. Paris: PUF.

Piaget, J., & Inhelder, B. (1966). *La psychologie de l'enfant* (Presses Un). Paris.

Plass, J. L., Homer, B. D., Pawar, S., Brenner, C., & MacNamara, A. P. (2019). The effect of adaptive difficulty adjustment on the effectiveness of a game to develop executive function skills for learners of different ages. *Cognitive Development*, *49*, 56–67.

https://doi.org/10.1016/j.cogdev.2018.11.006

Pobelle, E., & Roux, C. (2021a). *J'apprends mieux à la maternelle*. Paris: Nathan.

Pobelle, E., & Roux, C. (2021b). *J'apprends mieux en primaire*. Paris: Nathan.

Pomerance, L., Greenberg, J., & Walsh, K. (2016). *Learning about learning: What evry new teacher needs to know*. Washington DC: National Council on Teachers Quality.

Proust, J. (2018). La métacognition et l'autoévaluation. In *Le cerveau et les apprentissages*. Paris: Nathan.

Putnam, S. P., & Rothbart, M. K. (2006). Development of short and very short forms of the Children's Behavior Questionnaire. *Journal of Personality Assessment*, *87*(1), 103–113. https://doi.org/10.1207/s15327752jpa8701_09

Riley, M. S., & Greeno, J. G. (1988). Developmental Analysis of Understanding Language About Quantities and of Solving Problems. *Cognition and Instruction*, *5*(1), 49–101. https://doi.org/10.1207/s1532690xci0501_2

Riley, M. S., Greeno, J. G., & Heller, J. I. (1983). Development of Children's Problem-Solving Ability in Arithmetic. In *The Development of Mathematical Thinking* (pp. 153–196).

Roell, M., Viarouge, A., Hilscher, E., Houdé, O., & Borst, G. (2019). Evidence for a visuospatial bias in decimal number comparison in adolescents and in adults. *Scientific Reports*, *9*(1), 1–9. https://doi.org/10.1038/s41598-019-51392-6

Roell, M., Viarouge, A., Houdé, O., & Borst, G. (2017). Inhibitory control and decimal number comparison in school-aged children. *PLoS ONE*, *12*(11), 1–18. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0188276

Roell, M., Viarouge, A., Houdé, O., & 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

Roll, S. (1970). Reversibility Training and Stimulus Desirability as Factors in Conservation of Number. *Child Development*, *41*(2), 501–507.

Romine, C. B., & Reynolds, C. R. (2005). A Model of the Development of Frontal Lobe Functioning: Findings From a Meta-Analysis. *Applied Neuropsychology*, *12*(4), 190–201.

Rossi, S., Cassotti, M., Moutier, S., Delcroix, N., & Houdé, O. (2015). Helping reasoners succeed in the wason selection task: When executive learning discourages heuristic response but does not necessarily encourage logic. *PLoS ONE*, *10*(4), 1–17. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0123024

Rossi, S., Vidal, J., Letang, M., Houdé, O., & Borst, G. (2019). Adolescents and adults need inhibitory control to compare fractions. *Journal of Numerical Cognition*, *5*(3), 314–336. https://doi.org/10.5964/jnc.v5i3.197

Rossignoli-Palomeque, T., Perez-Hernandez, E., & González-Marqués, J. (2018). Brain training in children and adolescents: Is it scientifically valid? *Frontiers in Psychology*, *9*, 1–23. https://doi.org/10.3389/fpsyg.2018.00565

Sander, E., Gros, H., Gvozdic, K., & Scheibling-Sève, C. (2018). *Les neurosciences en éducation*. Paris: Retz.

Schumacher, R. F., & Fuchs, L. S. (2012). Does understanding relational terminology mediate effects of intervention on compare word problems? *Journal of Experimental Child Psychology*, *111*(4), 607–628. https://doi.org/10.1016/j.jecp.2011.12.001

Shirk, J., & Bonney, R. (2020). What is citizen science. In C. Lepczyk, O. Boyle, & T. Vargo (Eds.), *Handbook of citizen science in ecology and conservation* (pp. 7–16). Oakland: University of California Press.

Siegler, R. (1996). *Emerging minds : The process of change in children's thinking*. New-York: Oxford University Press.

Siegler, R., Fazio, L. K., Bailey, D. H., & Zhou, X. (2013). Fractions: The new frontier for theories of numerical development. *Trends in Cognitive Sciences*, *17*(1), 13–19. https://doi.org/10.1016/j.tics.2012.11.004

Siegler, R., Thompson, C. A., & Schneider, M. (2011). An integrated theory of whole number and fractions development. *Cognitive Psychology*, *62*(4), 273–296. https://doi.org/10.1016/j.cogpsych.2011.03.001

Sigman, M., Peña, M., Goldin, A. P., & Ribeiro, S. (2014). Neuroscience and education: Prime time to build the bridge. *Nature Neuroscience*, *17*(4), 497–502. https://doi.org/10.1038/nn.3672

St Clair-Thompson, H. L., & 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

Stern, E. (1993). What makes certain arithmetic word problems involving the comparison of sets so difficult for children? *Journal of Educational Psychology*, *85*(1), 7–23. https://doi.org/10.1037//0022-0663.85.1.7

Stothart, C. R., Simons, D. J., Boot, W. R., & Kramer, A. F. (2014). Is the effect of aerobic exercise on cognition a placebo effect? *PLoS ONE*, *9*(10), 1–7. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0109557

Strasser, B. J., Baudry, J., Mahr, D., Sanchez, G., & Tancoigne, E. (2019). Citizen Science ? Rethinking Science and Public Participation. *Science & Technology Studies*, *32*(2), 52–76.

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

Talanow, T., & Ettinger, U. (2018). Effects of task repetition but no transfer of inhibitory control training in healthy adults. *Acta Psychologica*, *187*(April), 37–53. https://doi.org/10.1016/j.actpsy.2018.04.016

Thevenot, C. (2017). *Arithmetic Word Problem Solving: The Role of Prior Knowledge*. *Acquisition of Complex Arithmetic Skills and Higher-Order Mathematics Concepts*. Elsevier Inc. https://doi.org/10.1016/b978-0-12-805086-6.00003-5

Thorell, L. B., Lindqvist, S., Nutley, S. B., Bohlin, G., & 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

Tipper, S. P. (1985). The Negative Priming Effect. Inhibitory Priming By Ignored Objects. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *37*, 571–590.

Traverso, L., Viterbori, P., & Usai, M. C. (2019). Effectiveness of an executive function training

in italian preschool educational services and far transfer effects to pre-academic skills. *Frontiers in Psychology*, *10*(September), 1–15. https://doi.org/10.3389/fpsyg.2019.02053

Trbovich, P. L., & Fevre, J. L. E. (2003). Phonological and visual working memory in mental addition. *Memory & Cognition*, *31*(5), 738–745.

Trulson, M. E. (1986). Martial Arts Trainin: A novel "Cure" for Juvenile Delinquency. *Human Relations*, *39*(12), 1131–1140.

Vamvakoussi, X. (2015). The development of rational number knowledge: Old topic, new insights. *Learning and Instruction*, *37*(February 2015), 50–55. https://doi.org/10.1016/j.learninstruc.2015.01.002

Vamvakoussi, X., Dooren, W. Van, & Verschaffel, L. (2012). The Journal of Mathematical Behavior Naturally biased ? In search for reaction time evidence for a natural number bias in adults. *Journal of Mathematical Behavior*, *31*(3), 344–355. https://doi.org/10.1016/j.jmathb.2012.02.001

Vamvakoussi, X., & Vosniadou, S. (2010). How many decimals are there between two fractions? aspects of secondary school students' understanding of rational numbers and their notation. *Cognition and Instruction*, *28*(2), 181–209. https://doi.org/10.1080/07370001003676603

Van Dooren, W., Lehtinen, E., & Verschaffel, L. (2015). Unraveling the gap between natural and rational numbers. *Learning and Instruction*, *37*, 1–4. https://doi.org/10.1016/j.learninstruc.2015.01.001

Van Gerven, P. W. M., Hurks, P. P. M., Bovend'Eerdt, T. J. H., & Adam, J. J. (2016). Switch hands! Mapping proactive and reactive cognitive control across the life span. *Developmental Psychology*, *52*(6), 960–971. https://doi.org/10.1037/dev0000116

Van Hoof, J., Lijnen, T., Verschaffel, L., & Van Dooren, W. (2013). Are secondary school students still hampered by the natural number bias? A reaction time study on fraction comparison tasks. *Research in Mathematics Education*, *15*(2), 154–164. https://doi.org/10.1080/14794802.2013.797747

Verschaffel, L. (1994). Using Retelling Data to Study Elementary School Children ' s Representations and Solutions of Compare Problems Author (s): Lieven Verschaffel Source : Journal for Research in Mathematics Education , Mar ., 1994 , Vol . 25 , No . 2 Published by : Nationa, *25*(2), 141–165.

Verschaffel, L., De Corte, E., & Pauwels, A. (1992). Solving Compare Problems: An Eye Movement Test of Lewis and Mayer's Consistency Hypothesis. *Journal of Educational Psychology*, *84*(1), 85–94. https://doi.org/10.1037/0022-0663.84.1.85

Wallach, L., Wall, A. J., & Anderson, L. (1967). Number conservation: the roles of reversibility, addition-subtraction, and misleading perceptual cues. *Child Development*, *38*(2), 425–442. https://doi.org/10.1111/j.1467-8624.1967.tb04353.x

Wang, Y., Li, K., Gai, X., & Cao, Y. (2020). Training and transfer effects of response inhibition training with online feedback on adolescents and adults' executive function. *Acta Psychologica Sinica*, *52*(10), 1212–1223. https://doi.org/10.3724/SP.J.1041.2020.01212

Wynn, K. (1992). Addition and subtraction by human infants. *Nature*, *359*, 749–750.

Yuen, M., Westwood, P., & Wong, G. (2005). Meeting the needs of students with specific

learning difficulties in the mainstream education system: Data from primary school teachers in Hong Kong. *International Journal of Special Education*, *20*(1), 67–76.

Zelazo, P. D. (2006). The Dimensional Change Card Sort (DCCS): A method of assessing executive function in children. *Nature Protocols*, *1*(1), 297–301. https://doi.org/10.1038/nprot.2006.46

Zellem, R. T., Pearson, K. A., Blaser, E., Fowler, M., Ciardi, D. R., Biferno, A., … Malvache, A. (2020). Utilizing small telescopes operated by citizen scientists for transiting exoplanet follow-up. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, *132*(1011), 1–44. https://doi.org/10.1088/1538-3873/ab7ee7

Zhao, X., Chen, L., Fu, L., & Maes, J. H. R. (2015). "Wesley says": A children's response inhibition playground training game yields preliminary evidence of transfer effects. *Frontiers in Psychology*, *6*(FEB), 1–7. https://doi.org/10.3389/fpsyg.2015.00207

Zhao, X., Chen, L., & Maes, J. H. R. R. (2016). Training and transfer effects of response inhibition training in children and adults. *Developmental Science*, *21*(1). https://doi.org/10.1111/desc.12511

Zhao, X., & Jia, L. (2018). Training and transfer effects of interference control training in children and yound adults. *Developmental Science*, *53*, 1519–1530. https://doi.org/10.1111/desc.12511

Zoellick, B., Nelson, S. J., & Schauffler, M. (2012). Participatory science and education: Bringing both views into focus. *Frontiers in Ecology and the Environment*, *10*(6), 310–313. https://doi.org/10.1890/110277

ANNEXES

Sommaire des annexes

Annexe 1 : Létang, M., Citron, P., Garbarg-Chenon, J., Houdé, O., & Brost, G. (2021). Bridging the Gap between the Lab and the Classroom: An Online Citizen Scientific Research Project with Teachers Aiming at Improving Inhibitory Control of School-Age Children, *Mind, Brain, and Education*, *15*(1), 122-128. iii

Annexe 2 : Adaptation du Stroop couleur pour une passation papier-crayon..... x

Annexe 3 : Description des neuf activités d'entrainement, ainsi que leur ordre de présentation au cours de cinq semaines d'entrainement xii

Annexe 4 : Exercice de la comparaison de nombres décimaux xv

Annexe 5 : Exercice de la comparaison de fractions xvi

Annexe 6 : Exercice de la multiplication par 10..... xvii

Annexe 7 : Exercice de la soustraction avec retenue xviii

Annexe 8 : Exercice des accords après les et vous (fiche élève et fiche enseignant à dicter).. xix

Annexe 9 : Exercice des accords en nombre (fiche élève et fiche enseignant à dicter)..... xxi

Annexe 10 : Exercice le chiffre des unités xxiii

Annexe 11 : Les problèmes arithmétiques à contenus verbaux xxiv

Annexe 12 : Script de l'intervention exécutive à la résolution de problèmes arithmétiques à contenus verbaux..... xxv

Annexe 13 : Script de l'intervention contrôle à la résolution de problèmes arithmétiques à contenus verbaux xxix

Annexe 14 : Script de l'intervention exécutive à la tâche de conservation du nombre xxxii

Annexe 15 : Script de l'intervention contrôle à la tâche de conservation du nombre xxxvi

Annexe 16 : Couverture et sommaire de Létang, M., & Garbarg-Chenon, J. (2020). *Entrainer le cerveau à résister – Coffret – Non-lecteurs*. Nathan. ……..…….. xl

Annexe 17 : Couverture et sommaire de Garbarg-Chenon, J., & Létang, M. (2020). *Entrainer le cerveau à résister – Coffret – Lecteurs*. Nathan. ……. xliv

Annexe 18 : Poster « Capitaine Inhibition ! Entrainer le cerveau à résister » ……...… xlviii

Annexe 19 : Couvertures des trois jeux Flexigame issus de la collection « Du labo à l'école » …… xlix

Annexe 20 : Programme des six séances pédagogiques proposées aux élèves de la 6ème à la 3ème ……... lii

Annexe 1 : **Létang, M., Citron, P., Garbarg-Chenon, J., Houdé, O., & Brost, G. (2021). Bridging the Gap between the Lab and the Classroom: An Online Citizen Scientific Research Project with Teachers Aiming at Improving Inhibitory Control of School-Age Children, *Mind, Brain, and Education, 15*(1), 122-128.**

MIND, BRAIN, AND EDUCATION

Bridging the Gap between the Lab and the Classroom: An Online Citizen Scientific Research Project with Teachers Aiming at Improving Inhibitory Control of School-Age Children

Marie Letang[1,2], Pascaline Citron[2], Julien Garbarg-Chenon[2], Olivier Houdé[1,3,†], and Grégoire Borst[1,3,†]

ABSTRACT— Online citizen science allows us to bridge the gap between researchers and nonresearchers and to improve the scientific literacy of nonresearchers. The aims of the present study were (a) to determine whether a 5-week randomized control trial conducted by teachers in their classroom could improve 7- to 12-year-old children's inhibitory control (IC) and (b) to provide proof of concept that online scientific research projects can provide meaningful results in the context of education. As expected, children in the IC training group improved their IC efficiency to a greater extent than children in the control training group. We provide the first evidence that such online scientific research projects can be effective in improving children's IC abilities and bridge the gap between the lab and the classroom.

The use of neuroscience to improve education has been debated for the last 15 years, with some researchers arguing that neuroscience and education could be a bridge too far long (Bowers, 2016) while others see more promise in the emerging fields of neuroscience and education (e.g., Ansari, De Smedt, & Grabner, 2012). Thus far, most of the debate has been focused on whether new insights into how the brain functions can improve teaching and educational practice but less so on how to effectively bridge the gap between the lab and the classroom.

One fruitful way to bridge the gap between the two communities is to have nonresearchers participate in scientific research projects. In citizen or participatory science, researchers and nonresearchers collaborate on a project. There are different types of participatory science projects with different levels of participation of nonresearchers: at the minimum, nonresearchers are involved in data collection, but in some projects, nonresearchers also define the problem and design the materials and the method to be used in the study, together with the researchers (community or cocreated projects). Participatory science is not a new phenomenon, especially in scientific domains in which the collection of a large amount of data is needed, such as in ecology, botany, or astronomy (Miller-Rushing, Primack, & Bonney, 2012). The number of citizen science projects has grown exponentially due to the advent and proliferation of internet-based platforms that can dramatically boost a project's visibility, functionality, and accessibility (Bonney et al., 2014). Participatory science not only allows us to bridge the gap between researchers and nonresearchers but also has the potential of improving the scientific literacy

[1]Université de Paris, LaPsyDÉ, CNRS, Paris, France
[2]Lea.fr, Nathan Editions, Paris, Paris
[3]Institut Universitaire de France, Paris, France

Address correspondence to Grégoire Borst, Laboratory for the Psychology of Child Development and Education, CNRS UMR 8240, Sorbonne, 46 rue Saint-Jacques, 75005 Paris, France; e-mail: gregoire.borst@parisdescartes.fr

† These authors contributed equally.

© 2020 International Mind, Brain, and Education Society and Wiley Periodicals LLC

of nonresearchers, especially through cocreated projects (Bonney, Phillips, Ballard, & Enck, 2015).

However, to our knowledge, there is no co-created online participatory science project involving teachers adopting a randomized control trial (RCT) method to evaluate the effect of a specific classroom intervention on children's abilities. Note that previous studies on preschoolers engaged teachers in conducting executive function interventions in the classroom (Duncan, Schmitt, Burke, & McClelland, 2018; Traverso, Viterbori, & Usai, 2019), but in these studies, teachers did not design the materials for the training and the pre- and post-training tests with the researchers using an online platform. The aims of the present study were twofold: (a) to determine the effect of an RCT conducted by 48 teachers in their classrooms focusing on improving the inhibitory control abilities of 7 to 12-year-old children throughout classroom activities and (b) to provide proof of concept that online scientific research projects can provide meaningful results in the context of education. We focused on inhibitory control (IC, i.e., the ability to resist automatisms, temptations, distractions, or interference and to adapt to conflicting situations, Diamond, 2013) for three main reasons. First, IC is at the root of the development of complex skills and, more generally, of cognitive development (Borst, Aïte, & Houdé, 2015). Second, IC abilities in childhood predict later academic and professional success (Moffitt et al., 2011). Third, classroom activities can improve children's executive control and IC (Diamond, Barnett, Thomas, & Munro, 2007 *but see*, e.g., Talanow & Ettinger, 2018; for studies reporting that IC training has no effect).

IC involves different abilities, particularly, response inhibition (i.e., the ability to prevent a prepotent motor response irrelevant to an ongoing task) and interference control (i.e., the ability to selectively attend to task-relevant information by suppressing the processing of task-irrelevant information) (see Diamond, 2013 and also see Nigg, 2000 for another taxonomy of IC abilities). Different IC tasks have been designed to assess different IC abilities. The Go/NoGo task typically assesses response inhibition, while the Color-Word Stroop task assesses interference control (Diamond, 2013). In the present study, we chose performance in the Color-Word Stroop task as the outcome variable because (a) a number of studies provide converging evidence that overcoming systematic errors in different academic learning tasks in primary school is rooted in part in the ability to inhibit task-irrelevant information (e.g., Ahr, Houdé, & Borst, 2016; Roell, Viarouge, Houdé, & Borst, 2019) and (b) the Color-Word Strop task could be easily adapted for a group paper-and-pencil task. Note that because we used the Color-Word Strop task, we restricted the study to children who were able to read.

Teachers volunteered to participate via a dedicated digital platform, www.lea.fr - Nathan©. Teachers coconstructed the study with the researchers and collected data on the pre- and post-test sessions. Furthermore, the teachers randomly assigned, in each classroom, children to the IC training and control training group (to control for potential teacher effects, Nye, Konstantopoulos, & Hedges, 2004). Critically, the teachers also designed and conducted the daily classroom activities that were part of the training. Specifically, the teachers and researchers designed two versions of the classroom activities, one involving IC and another that did not. School-age children from grade 2 to grade 5 collectively performed a paper-and-pencil adaptation of the Color-Word Stroop task in the pre- and post-training sessions. For the Color-Word Stroop task, participants are instructed to determine the ink color of a printed word. In the congruent Stroop items, the ink color is congruent with the color denoted by the word (e.g., BLUE printed in blue). For the incongruent Stroop items, the ink color is incongruent with the color denoted by the word (e.g., written in blue). The incongruent items typically require the participant to inhibit task-irrelevant information (i.e., the color denoted by the word). We chose the Color-Word Stroop task because our aim was to demonstrate that classroom activities can improve IC abilities. Thus, we selected one of the most seminal IC tasks that could be easily adapted to the constraints of group testing by the teachers in their classroom (quickly set up, quickly performed, pencil-and-paper task allowing group administration). In line with studies showing that executive functions and IC abilities in particular can be improved with classroom and playground activities (Diamond et al., 2007), we expected children in the IC training group to improve their performance in the incongruent Stroop items from pre- to post-training sessions to a greater extent than children from the control group, who received different training.

METHOD

Participants

We recruited 1,185 children from 7 to 12 years of age. A total of 136 children were excluded from the study because they performed only the pre- or post-training sessions. Thus, we analyzed data on 1,049 children: 161 2nd graders (81 boys, 7.6 ± 0.3 years), 143 3rd graders (80 boys, 8.7 ± 0.4 years), 321 4th graders (172 boys, 9.7 ± 0.4 years), and 424 5th graders (212 boys, 10.6 ± 0.4 years). Children in each class were randomly assigned to one of two groups: the CI training group ($N = 525$; $M = 9.6 \pm 1.13$ years of age, 251 girls) or the control ($N = 524$; $M = 9.6 \pm 1.12$ years of age, 253 girls) group. In each classroom, on average, 12 children were assigned to the control intervention and 12 to the IC intervention.

The study was carried out in accordance with national and international norms that govern the use of human research

participants. The internal ethical board of the Department of Psychology (Université de Paris) ruled that in light of the potential risks for the participants of the present study, no formal ethical approval by one of the national ethical committees was needed in agreement with the ethical law governing human research in France. Participation was voluntary after obtaining informed consents from the children's legal guardians.

Materials and Procedure

Teachers (N = 48) were recruited via a digital pedagogical and collaborative network of teachers: www.lea.fr. This platform offers free educational resources and classroom activities to teachers. All teachers voluntarily signed up on this platform. The platform hosts a number of projects, including the online citizen scientific research project proposed by the authors. All teachers were from French-speaking public primary schools serving a diverse population of children. We used the platform to recruit teachers, to define the aims of the project and the hypotheses, to train teachers on the RCT methodology, to design and upload the materials used for the classroom activities and the pre- and post-training session, and to obtain the data collected by the teachers during the pre- and post-training sessions. The researchers were involved in all the different steps of the project. The researchers started by selecting the resources (such as articles, conferences, and book chapters) to familiarize the teachers with the concept of IC and its role in academic learning. Then, the researchers provided a set of resources to explain the methodological principles of RCTs (random assignments, control group, standardization of the intervention and of the testing, pre- and post-test sessions, etc.). All of these resources were posted in a dedicated section of the platform. The teachers could interact with the researchers at each and every step of the project via a forum that allowed the teachers to ask any methodological and logistical questions and provide feedback on the materials designed by the researchers for the testing and interventions. The researchers and teachers started to interact when working on the different parts of the project 2 months before data were collected in the preintervention session.

Pre- and Post-Test Sessions

In the pre- and post-test sessions, the children's IC abilities were assessed by their teachers in their classroom with a paper-and-pencil adaptation of the Color-Word Stroop task (Stroop, 1935). For each word presented, the children were required to identify the ink color of the word as quickly and as accurately as possible by writing the initial of the ink color ('R' for 'red', 'G' for 'green', 'B' for 'blue', and 'Y' for 'yellow') on a response sheet. In the congruent condition, for each item, the ink color was congruent with the color denoted by the word (e.g., BLUE printed in blue). In the incongruent condition, in each item, the ink color was incongruent with the color denoted by the word (e.g., RED written in blue). The incongruent condition typically required the participants to inhibit the task-irrelevant information (i.e., the color denoted by the word). There were 80 items in each condition. In each condition, the children had 40 s to complete as many items as possible. The 40 s limit was determined based on the result of a pretest showing no floor or ceiling effects for 2nd to 5th graders. Each condition was preceded by eight training items. All children completed the congruent before the incongruent condition. The teachers collected the number of correct responses for each of the two conditions and sent them to the researchers.

Training Sessions

Ten-minute training sessions occurred 4 days per week for 5 weeks. A total of nine classroom activities were designed, together with the teachers, to be performed collectively by each of the two training groups. Each training activity lasted either 5 or 10 min. We created six 10-min training sessions consisting of one (for 10 min long activities) or two activities (for 5 min long activities). Each session was repeated three times during the 5-week training except for two that were repeated four times (see Table 1). Two versions of each activity were created: one that required the inhibition of a prepotent response (performed by the IC training group) and one that did not (performed by the control training group). The teachers trained each group in their classroom: when one group was trained, the other group participated in a different autonomous school activity. In the IC training group, the activities were designed to train the participants to perform different types of IC processes from response inhibition to interference control (see Supplementary Materials).

The activities were proposed as part of the daily classroom activities. None of the children were aware of which group they were assigned to or of the purpose of the interventions. Both groups were told that they were playing games and participating in activities that allowed them to train their brains. The children were not told that they were playing different types of games. In each of the two interventions conducted by the teachers, the children participated in the same classroom activities irrespective of their age, grade, school, or teacher.

RESULTS

To determine the effect of IC training on the IC abilities of children, we conducted 2 (Condition: congruent vs. incongruent) × 2 (Time: pre- vs. post-test sessions) × 2 (Training group: IC vs. control) analyses of variance (ANOVA) on

Table 1
Order of Presentation of the Activities within Each of the 5 Weeks of the IC and Control Training

		Training Sessions			
		Day 1	*Day 2*	*Day 3*	*Day 4*
Training weeks	1	Wesley says & sort the cards	Beware the ant!	Play with faces & Clap your hands	Catch the totem!
	2	Play with words	Color your word & do as I do	Wesley says & sort the cards	Beware the ant!
	3	Play with faces & Clap your hands	Catch the totem!	Play with words	Color your word & do as I do
	4	Wesley says & sort the cards	Beware the ant!	Play with faces & clap your hands	Catch the totem!
	5	Play with words	Color your word & do as I do	Wesley says & sort the cards	Beware the ant!

Table 2
Average Interference Score on the Pre- and Post-Training Test for the Control and IC Training Groups by Grade

	2nd Grade		*3rd Grade*		*4th Grade*		*5th Grade*	
	Control	*IC*	*Control*	*IC*	*Control*	*IC*	*Control*	*IC*
Pre-training test	4.49	3.71	4.3	4.3	5.29	5.32	6.35	7.13
Post-training test	3.83	3.27	4.12	3.79	5.89	4.1	6.3	5.12

the number of correct responses for the Color-Word Stroop task.

The ANOVA revealed a significant three-way interaction among the Condition, Time, and Training group, $F(1, 1{,}047) = 10.49$, $p = .001$, $\eta^2_p = .01$ (see Table 2). Importantly, the children in the IC training group had lower interference scores (i.e., the difference in the number of correct responses in the congruent and incongruent conditions) and thus better IC abilities than the children in the control training group during the post-test session, $F(1, 1{,}047) = 11.4$, $p < .001$, $\eta^2_p = .01$, while we found no difference between the two groups for the pretest, $F < 1$ (see Figure 1). In addition, while the interference scores of the children in the IC training group decreased between the pre- and the post-test sessions, $F(1{,}524) = 18.04$, $p < .001$, $\eta^2_p = .03$, the interference scores of the children in the control training group did not change between sessions, $F < 1$.[1]

DISCUSSION

The aim of the current study was twofold: (a) to measure the effect of a 5-week IC training intervention in the classroom on the IC abilities of 7- to 12-year-old children and (b) to provide proof of concept that a citizen science project taking the form of an RCT can provide meaningful results. As expected, we found that children engaged in classroom activities involving IC for 5 weeks improved their IC abilities to a greater extent than children engaged in classroom activities not involving IC. Importantly, the teachers collected data during the pre- and post-training sessions, randomly assigned the children in the two training groups, and conducted the training. Thus, the results of the present study replicate those reported in previous studies (e.g., Diamond et al., 2007) but in this study, the teachers were involved in all parts of the project. Thus, our study provides the first evidence that teachers can become experimenters in their own classroom by adopting the experimental methodology classically used by researchers in the lab.

Embracing the role of an experimenter in the classroom is complicated for teachers because it requires them to adopt a neutral attitude during the testing sessions and the random assignment of students to training groups, which goes against their natural inclination to help children with academic difficulties (Yuen, Westwood, & Wong, 2005). Teachers are typically tempted to help these children by assigning them to the experimental group so that they could benefit from the intervention. However, our results show that there was no difference in the performance of the children assigned to the IC and those assigned to the control group during the pretest session, suggesting that the teachers were not biased in terms of assigning the children to the training groups. For now, the degree to which the approach we used to train teachers to carry out RCTs is sustainable (i.e., teachers can carry out an RCT without supervision and can train other teachers) is an open question. Further studies are thus needed on this topic.

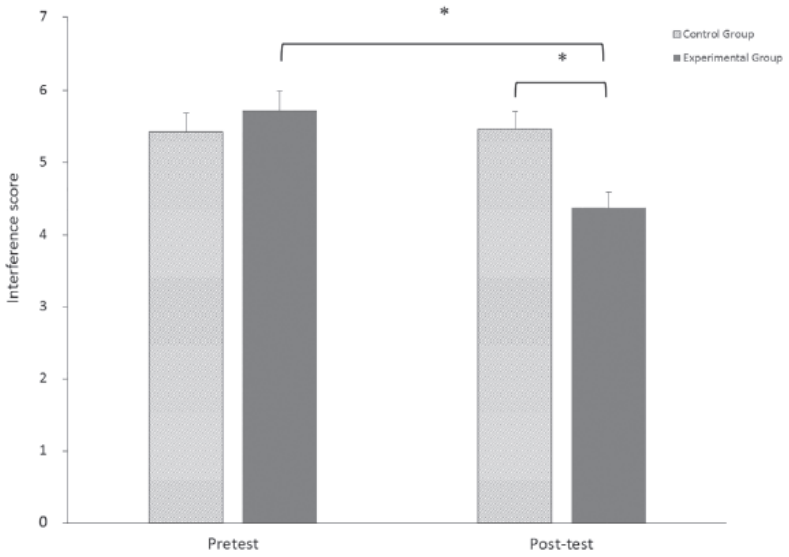


Fig. 1. Average interference score (i.e., the difference in the number of correct responses provided in the congruent and incongruent conditions) on the pre- and post-training test for the control and IC training groups. The error bars depict the standard error of the mean. *$p < .001$.

We note that previous studies on IC training reported inconsistent near or far transfer effects. For instance, in preschool children, computerized IC training improved abstract reasoning abilities (i.e., far transfer) (Liu, Zhu, Ziegler, & Shi, 2015). In school-aged children, IC training using a playground activity (e.g., 'Wesley says') improved performance in the Go/NoGo task (i.e., response inhibition) but not in the Stroop task involving interference control (Zhao, Chen, Fu, & Maes, 2015). In addition, a game-based IC training improved performance in untrained response inhibition (Go/NoGo task) and interference control (i.e., Flanker and Stroop-like tasks) tasks and in reading speed (i.e., far transfer) (Johann & Karbach, 2019). Moreover, computerized IC training improved working memory (Zhao & Jia, 2018) and fluid intelligence (Aydmune, Introzzi, & Lipina, 2019). However, several studies have shown no near or far transfer effects following IC training (Talanow & Ettinger, 2018) or age dependent near transfer effects (i.e., in children but not in adults, Zhao, Chen, & Maes, 2016). In this context, our results suggest that classroom activities involving response inhibition and interference control improve the interference control of school-aged children as assessed in a Color-Word Stroop task (i.e., near transfer).

The present study has three major limitations. First, we used only one IC task to assess the children's IC abilities. Given that the Color-Word Stroop task assesses only interference control (i.e., the ability to selectively attend to task-relevant information by suppressing attention to task-irrelevant information), we have no evidence that the classroom activities proposed in the IC intervention improve other types of IC processes such as response inhibition (i.e., the ability to prevent a prepotent motor response irrelevant to an ongoing task) assessed via the Go/NoGo task, for instance (see, e.g., Diamond, 2013). In addition, using a paper-and-pencil adaptation of the Color-Word Stroop task and administering this task in groups could have influenced the type of IC processes measured in this task. Further studies are thus needed to determine (a) the extent to which different types of IC abilities could be improved by the classroom activities designed in the present study and (b) whether we could replicate the improvement using a seminal version of the Color-Word Stroop task (i.e., performed individually with response provided orally).

Second, we note that a number of biases could have affected the reliability of the results reported in the present study. For instance, having teachers deliver the interventions and administer and score the Color-Word Stroop task during the pre- and postintervention sessions could have led to the experimenter expectancy effect. We tried to alleviate some of these biases by informing teachers about all of the potential biases that could affect the reliability of the results in RCTs and, more generally, experimental studies and how these biases are generally controlled for. Further studies will need to determine more systematically the degree to which such biases can be controlled for as well as the size of their affects in citizen scientific research projects.

Third, we did not measure the far transfer effect of the classroom activities on academic learning and/or the classroom climate, so we have limited evidence that the activities can have beneficial effects for learning and/or education. That said, we note that a growing number of studies provide converging evidence that overcoming systematic errors in different types of academic learning is rooted in part in the ability to inhibit task-irrelevant information – an IC processes similar to the one assessed in the Color-Word Stroop task – such as in mirror letter discrimination (e.g., Ahr et al., 2016;), or in rational number comparison (Roell et al., 2019). Thus, we speculate that far transfer could be observed in particular in academic learning rooted in part in the ability to inhibit task-irrelevant information. However, future studies are needed to provide evidence that classroom activities such as those proposed in the present study can actually transfer to academic learning and/or the school climate.

Taken together, our findings provide the first evidence that online citizen science can be conducted in the classroom to address problems of interest for both researchers and teachers using the experimental method in an ecological context without the direct intervention of researchers. Importantly, conducting online citizen science with teachers could prevent the diffusion of weak or outdated scientific evidence that contributes to the diffusion of neuromyths in the teaching community (Howard Jones, 2014) by improving communication and collaboration between researchers and teachers.

CONFLICT OF INTEREST

Authors have no conflict of interest.

SUPPORTING INFORMATION

Additional supporting information may be found online in the Supporting Information section at the end of the article.

Table S1. Order of presentation of the activities within each of the 5 weeks of the IC and control training

NOTE

1 Note that a 2 (Time: pre- vs. post-test sessions) x 2 (Training group: IC vs. control) x 4 (Grade: 2nd vs. 3rd vs. 4th vs. 5th) analyses of variance (ANOVA) on the interference scores in the Color-Word Stroop Task revealed no three-way interaction among Time, Training group, and Grade, $F(3,1,041) = 1.32$, $p = .27$, suggesting that age did not affect the effectiveness of the intervention.

REFERENCES

Ahr, E., Houdé, O., & Borst, G. (2016). Inhibition of the mirror generalization process in reading in school-aged children. *Journal of Experimental Child Psychology*, *145*, 157–165. https://doi.org/10.1016/j.jecp.2015.12.009

Ansari, D., De Smedt, B., & Grabner, R. H. (2012). Neuroeducation - a critical overview of an emerging field. *Neuroethics*, *5*(2), 105–117. https://doi.org/10.1007/s12152-011-9119-3

Aydmune, Y., Introzzi, I., & Lipina, S. (2019). Inhibitory processes training for school-age children: Transfer effects. *Developmental Neuropsychology*, *44*(7), 513–542. https://doi.org/10.1080/87565641.2019.1677667

Bonney, R., Phillips, T. B., Ballard, H. L., & Enck, J. W. (2015). Can citizen science enhance public understanding of science? *Public Understanding of Science*, *25*(1), 1–15. https://doi.org/10.1177/0963662515607406

Bonney, R., Shirk, J. L., Phillips, T. B., Wiggins, A., Ballard, H. L., Miller-Rushing, A. J., & Parrish, J. K. (2014). Next steps for citizen science. *Science*, *343*(6178), 1436–1437.

Borst, G., Aïte, A., & Houdé, O. (2015). Inhibition of misleading heuristics as a core mechanism for typical cognitive development: Evidence from behavioural and brain-imaging studies. *Developmental Medicine and Child Neurology*, *57*(s2), 21–25. https://doi.org/10.1111/dmcn.12688

Bowers, J. S. (2016). The practical and principled problems with educational neuroscience. *Psychological Review*, *123*(5), 600–612. https://doi.org/10.1037/rev0000025

Diamond, A. (2013). Executive functions. *Annual Review of Psychology*, *64*, 135–168. https://doi.org/10.1146/annurev-psych-113011-143750

Diamond, A., Barnett, W. S., Thomas, J., & Munro, S. (2007). Preschool program improves cognitive control. *Science*, *318*, 1387–1388. https://doi.org/10.1126/science.1151148

Duncan, R. J., Schmitt, S. A., Burke, M., & McClelland, M. M. (2018). Combining a kindergarten readiness summer program with a self-regulation intervention improves school readiness. *Early Childhood Research Quarterly*, *42*, 291–300.

Howard-Jones, P. A. (2014). Neuroscience and education: myths and messages. *Nature Reviews Neuroscience*, *15*(12), 817–824.

Johann, V., & Karbach, J. (2019). Effects of game-based and standard executive control training on cognitive and academic abilities in elementary school children. *Developmental Science*, *23*(4), 1–18. https://doi.org/10.1111/desc.12866

Liu, Q., Zhu, X., Ziegler, A., & Shi, J. (2015). The effects of inhibitory control training for preschoolers on reasoning ability and neural activity. *Scientific Reports*, *5*, 1–10. https://doi.org/10.1038/srep14200

Miller-Rushing, A., Primack, R., & Bonney, R. (2012). The history of public participation in ecological research. *Frontiers in Ecology and the Environment*, *10*(6), 285–290. https://doi.org/10.1890/110278

Moffitt, T. E., Arseneault, L., Belsky, D., Dickson, N., Hancox, R. J., Harrington, H., … Caspi, A. (2011). A gradient of childhood self-control predicts health, wealth, and public safety. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *108*(7), 2693–2698. https://doi.org/10.1073/pnas.1010076108

Nigg, J. T. (2000). On inhibition/disinhibition in developmental psychopathology: views from cognitive and personality psychology and a working inhibition taxonomy. *Psychological bulletin*, *126*(2), 220.

Nye, B., Konstantopoulos, S., & Hedges, L. V. (2004). How large are teacher effects? *Educational Evaluation and Policy Analysis*, *26*(3), 237–257. https://doi.org/10.3102/01623737026003237

Roell, M., Viarouge, A., Houdé, O., & 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

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

Talanow, T., & Ettinger, U. (2018). Effects of task repetition but no transfer of inhibitory control training in healthy adults. *Acta Psychologica*, *187*(April), 37–53. https://doi.org/10.1016/j.actpsy.2018.04.016

Traverso, L., Viterbori, P., & Usai, M. C. (2019). Effectiveness of an executive function training in italian preschool educational services and far transfer effects to pre-academic skills. *Frontiers in Psychology*, *10*, 1–15. https://doi.org/10.3389/fpsyg.2019.02053

Yuen, M., Westwood, P., & Wong, G. (2005). Meeting the needs of students with specific learning difficulties in the mainstream education system: Data from primary school teachers in Hong Kong. *International Journal of Special Education*, *20*(1), 67–76.

Zhao, X., Chen, L., Fu, L., & Maes, J. H. R. (2015). "Wesley says": A children's response inhibition playground training game yields preliminary evidence of transfer effects. *Frontiers in Psychology*, *6*(FEB), 1–7. https://doi.org/10.3389/fpsyg.2015.00207

Zhao, X., Chen, L., & Maes, J. H. R. R. (2016). Training and transfer effects of response inhibition training in children and adults. *Developmental Science*, *21*(1), e12511. https://doi.org/10.1111/desc.12511

Zhao, X., & Jia, L. (2018). Training and transfer effects of interference control training in children and yound adults. *Developmental Science*, *53*, 1519–1530. https://doi.org/10.1111/desc.12511

Annexe 2 : Adaptation du Stroop couleur pour une passation papier-crayon

Prénom :

Test A : De gauche à droite, puis de haut en bas, écrivez la première lettre de la couleur de l'encre dans laquelle le mot est imprimé dans la case correspondante.

Exemples :

1	2	3	4	1	2	3	4
Vert	Rouge	Bleu	Jaune	V	R	B	J
Bleu	Jaune	Rouge	Vert				

Test :

1	2	3	4	1	2	3	4
Rouge	Vert	Jaune	Bleu				
Vert	Jaune	Rouge	Bleu				
Rouge	Vert	Bleu	Jaune				
Bleu	Jaune	Vert	Rouge				
Vert	Bleu	Jaune	Rouge				
Jaune	Rouge	Bleu	Vert				
Bleu	Rouge	Jaune	Vert				
Rouge	Bleu	Vert	Jaune				
Bleu	Vert	Rouge	Jaune				
Rouge	Vert	Jaune	Bleu				
Bleu	Jaune	Rouge	Vert				
Jaune	Bleu	Vert	Rouge				
Vert	Rouge	Jaune	Bleu				
Jaune	Bleu	Rouge	Vert				
Rouge	Vert	Bleu	Jaune				
Vert	Bleu	Rouge	Jaune				
Bleu	Jaune	Vert	Rouge				
Rouge	Vert	Bleu	Jaune				
Vert	Rouge	Jaune	Bleu				
Bleu	Vert	Jaune	Rouge				

Test B : De gauche à droite, et de haut en bas, écrivez la première lettre de la couleur de l'encre dans laquelle le mot est imprimé dans la case correspondante.

Exemples :

1	2	3	4	1	2	3	4
Jaune	Bleu	Rouge	Vert	V	R	J	B
Bleu	Rouge	Jaune	Vert				

Test :

1	2	3	4	1	2	3	4
Jaune	Vert	Rouge	Bleu				
Vert	Bleu	Jaune	Rouge				
Rouge	Vert	Jaune	Bleu				
Bleu	Jaune	Rouge	Vert				
Jaune	Rouge	Vert	Bleu				
Vert	Rouge	Vert	Jaune				
Jaune	Bleu	Vert	Rouge				
Bleu	Rouge	Jaune	vert				
Rouge	Vert	Bleu	Jaune				
Rouge	Vert	Jaune	Bleu				
Bleu	Jaune	Rouge	Vert				
Jaune	Rouge	Bleu	Vert				
Jaune	Bleu	Vert	Rouge				
Bleu	Rouge	Vert	Jaune				
Bleu	Vert	Jaune	Rouge				
Vert	Jaune	Bleu	Rouge				
Bleu	Jaune	Rouge	Vert				
Vert	Bleu	Rouge	Jaune				
Jaune	Rouge	Vert	Bleu				
Bleu	Jaune	Rouge	Vert				

Annexe 3 : Description des neuf activités d'entrainement, ainsi que leur ordre de présentation au cours de cinq semaines d'entrainement

Jacques a dit (5 minutes) : L'activité était une adaptation de la tâche proposée par Zhao, Chen, Fu & Maes (2015) pour entraîner le CI. On demandait aux enfants de faire différentes actions comme sauter ou taper dans leurs mains. Dans le groupe d'entrainement au CI, les enfants devaient faire ces actions uniquement si elles étaient précédées par « Jacques a dit ». Si la phrase ne commençait pas par « Jacques a dit », les enfants devaient rester immobile. Dans le groupe d'entrainement contrôle, toutes les phrases commençaient par « Jacques a dit ». L'activité se faisait en groupe.

Joue avec les mots (5 minutes) : Cette activité était une adaptation du test de Hayling (Burgess & Shallice, 1996). Les enfants de CM1 et CM2 devaient compléter chaque phrase avec un mot en lien (groupe d'entrainement contrôle) ou sans aucun lien (groupe d'entrainement au CI) avec le contexte sémantique. Les enfants de CE1 et CE2 devaient trouver un mot commençant par la même lettre ou syllabe (groupe d'entrainement contrôle) ou une lettre ou syllabe différente (groupe d'entrainement au CI) qu'un objet qu'on leur présentait en image sur une carte. L'activité se faisait en groupe.

Fais comme moi (5 minutes) : Cette activité était une adaptation de la Own Body Transformation task qui requière l'inhibition d'un biais egocentrique lorsqu'on doit adopter une perspective hétérocentrée (Aïte et al., 2016). Les enfants devaient imiter les actions de l'enseignant. L'enseignant était dos aux élèves dans le groupe d'entrainement contrôle, et face à eux dans le groupe d'entrainement au CI. L'activité se faisait en groupe.

Tri les cartes (10 minutes) : Cette activité est une adaptation de la Dimensional Change Card Sort task permettant de mesurer les FE (Zelazo, 2006). Les enseignants plaçaient quatre cartes sur une table face aux enfants. Ces cartes étaient composées d'une à quatre formes géométriques de différentes couleurs. Dans le groupe d'entrainement contrôle, on demandait aux enfants de trier leurs cartes selon un critère prédéfini (nombre, forme ou couleur). Dans le groupe d'entrainement au CI, les enfants devaient découvrir le critère de tri par le biais des retours de l'enseignant et s'adapter à chaque changement de critère de tri. Cette activité était réalisée par groupe de 4 à 6 enfants.

Colore ton mot (5 minutes) : Cette activité était une adaptation de la tâche de Stroop. Les enfants devaient dénommer la couleur d'encre d'un mot. Pour les élèves du groupe

d'entrainement contrôle la couleur du mot correspondait au sens du mot écrit, alors que pour les élèves du groupe d'entrainement au CI, la couleur du mot ne correspondait pas au sens du mot écrit. Cette activité se faisait en groupe.

Tape dans tes mains (5 minutes) : Dans cette activité, les enfants devaient taper dans leurs mains comme l'enseignant (groupe d'entrainement contrôle) ou taper une fois quand l'enseignant tapait une fois, rester immobile quand l'enseignant tapait deux fois dans ces mains et taper deux fois dans leurs mains quand l'enseignant tapait trois fois dans les siennes (groupe d'entrainement au CI).

Les visages (5 minutes) : L'activité était basée sur la tâche content/triste (Lagattuta, Sayfan, & Monsour, 2011). Les enseignants présentaient des cartes aux élèves comportant des visages contents ou tristes. Dans le groupe d'entrainement contrôle, les enfants devaient dire « content » face à un visage content et devaient dire « triste » face à un visage triste. Dans le groupe d'entrainement au CI, les enfants devaient dire « triste » face à un visage content et « content » face à un visage triste. L'activité se faisait en groupe.

Gare aux fourmis ! (10 minutes). Cette activité était une adaptation du jeu *Salade de cafards* (Gigamic). Les enfants étaient répartis en groupe de 4 à 6 et jouaient avec un jeu de cartes composé de cartes avec un fruit ou un fruit barré avec des fourmis dessus. Les uns après les autres, les enfants retournaient une carte sur la table et devaient dénommer le fruit présent sur celle-ci, sauf si cette dernière était avec un fruit barré avec des fourmis, dans ce cas ils devaient dire « fourmi ». Les enfants du groupe d'entrainement au CI jouaient avec une règle supplémentaire : si une carte avec un fruit barré et des fourmis était retournée, le nom de ce fruit n'avait plus le droit d'être prononcé pour les cartes suivantes. Si un enfant retourne ensuite une carte avec ce fruit interdit, il devait prononcer le nom d'un autre fruit.

Attrape le totem (10 minutes) : Cette activité est une adaptation du jeu *Jungle Speed* (Asmodee). Par groupe de 4 à 6 les enfants jouaient à un jeu composait d'un totem et de cartes colorées sur lesquelles un animal coloré était disposé. Tous les enfants retournaient une carte en simultanée sur la table. Si deux enfants avaient le même animal sur leur carte, ils devaient attraper le totem. Dans le groupe d'entrainement au CI, une carte supplémentaire était ajoutée au jeu. Quand une carte switch était retournée, les enfants devaient alors attraper le totem si deux joueurs avaient des cartes ayant la même couleur de fond. A l'apparition d'une autre carte switch, la règle change de nouveau et les enfants doivent attraper le totem lorsque leurs cartes représentent un même animal.

Ordre de présentation des activités des 5 semaines d'entrainement pour les deux groupes.

		Sessions d'entrainement			
		Jour 1	Jour 2	Jour 3	Jour 4
Semaines d'entrainement	1	Jacques a dit & Tri les cartes	Attention aux fourmis !	Les visages & Tape dans tes mains	Attrape le totem !
	2	Joue avec les mots	Colore les mots & Fais comme moi	Jacques a dit & Tri les cartes	Attention aux fourmis !
	3	Les visages & Tape dans tes mains	Attrape le totem !	Joue avec les mots	Colore les mots & Fais comme moi
	4	Jacques a dit & Tri les cartes	Attention aux fourmis !	Les visages & Tape dans tes mains	Attrape le totem !
	5	Joue avec les mots	Colore les mots & Fais comme moi	Jacques a dit & Tri les cartes	Attention aux fourmis !

Annexe 4 : **Exercice de la comparaison de nombres décimaux**

Prénom :

Pour chaque paire, entoure le nombre le plus grand.

1)	0,41	0,95	10)	0,3	0,8
2)	0,78	0,2	11)	0,254	0,116
3)	0,329	0,862	12)	0,69	0,554
4)	0,4	0,38	13)	0,751	0,2
5)	0,62	0,56	14)	0,6	0,521
6)	0,5	0,697	15)	0,4	0,3
7)	0,7	0,81	16)	0,439	0,97
8)	0,642	0,18	17)	0,2	0,79
9)	0,337	0,8	18)	0,69	0,554

Annexe 5 : **Exercice de la comparaison de fractions**

Prénom :

Pour chaque paire de fractions, entoure la fraction la plus grande.

1) $\frac{2}{1}$ $\frac{3}{1}$

2) $\frac{1}{4}$ $\frac{1}{3}$

3) $\frac{3}{4}$ $\frac{3}{2}$

4) $\frac{3}{2}$ $\frac{1}{2}$

5) $\frac{4}{2}$ $\frac{1}{2}$

6) $\frac{4}{5}$ $\frac{4}{2}$

7) $\frac{4}{1}$ $\frac{4}{2}$

8) $\frac{2}{3}$ $\frac{2}{4}$

9) $\frac{3}{1}$ $\frac{4}{1}$

10) $\frac{3}{4}$ $\frac{2}{4}$

11) $\frac{5}{4}$ $\frac{5}{3}$

12) $\frac{3}{5}$ $\frac{2}{5}$

Annexe 6 : **Exercice de la multiplication par 10**

Prénom :

Résous les opérations suivantes :

1) 48 x 10 =

2) 10 x 6,2 =

3) 10 x 9 =

4) 5,6 x 10 =

5) 10 x 3,5 =

6) 3,1 x 10 =

7) 72 x 10 =

8) 9,5 x 10 =

9) 10 x 24 =

10) 10 x 8,4 =

11) 10 x 80 =

12) 4 x 10 =

Annexe 7 : **Exercice de la soustraction avec retenue**

Prénom :

Résous les opérations suivantes :

1) $37 - 18 =$

2) $54 - 12 =$

3) $95 - 64 =$

4) $55 - 17 =$

5) $71 - 26 =$

6) $87 - 52 =$

7)
$$\begin{array}{r} 6\ 4 \\ -\ 1\ 1 \\ \hline \end{array}$$

8)
$$\begin{array}{r} 8\ 8 \\ -\ 6\ 7 \\ \hline \end{array}$$

9)
$$\begin{array}{r} 5\ 5 \\ -\ 1\ 7 \\ \hline \end{array}$$

10)
$$\begin{array}{r} 9\ 3 \\ -\ 5\ 4 \\ \hline \end{array}$$

11)
$$\begin{array}{r} 9\ 4 \\ -\ 3\ 7 \\ \hline \end{array}$$

12)
$$\begin{array}{r} 2\ 8 \\ -\ 1\ 6 \\ \hline \end{array}$$

Annexe 8 : **Exercice des accords après les et vous (fiche élève et fiche enseignant à dicter)**

Prénom :

Complète les phrases suivantes :

1. Je les _____ demain.
2. Vous _____ du pain.
3. Il _____ très vite.
4. J'ai _____ une balade.
5. Il cherche les _____.
6. Il a _____ son petit frère.
7. J'ai _____ mes devoirs.
8. Je mange les _____.
9. Il a _____ un nouveau short.
10. Je vous _____ les clés.
11. Il _____ son verre.
12. J'_____ mon pull.
13. Vous _____ de l'argent.
14. Il les _____ beaucoup.
15. Je vous _____ un poème.
16. Je _____ mes ongles.

La liste de phrases à compléter :

1. Je les donne demain.
2. Vous prendrez du pain.
3. Il grandit très vite.
4. J'ai fait une balade.
5. Il cherche les voitures.
6. Il a nourri son petit frère.
7. J'ai fini mes devoirs.
8. Je mange les fraises.
9. Il a choisi un nouveau short.
10. Je vous rendrai les clés.
11. Il remplit son verre.
12. J'agrandis mon pull.
13. Vous donnerez de l'argent.
14. Il les aime beaucoup.
15. Je vous écrirai un poème.
16. Je vernis mes ongles.

Annexe 9 : Exercice des accords en nombre (fiche élève et fiche enseignant à dicter)

Prénom :

Complète les phrases suivantes :

1) Les ouvriers _____ vite.

2) La troupe de théâtre s'_____.

3) Le pirate _____ un trésor.

4) La petite fille _____ du tamtam.

5) La classe de CE2 _____.

6) Les correspondants _____ demain.

7) Toute l'école _____ la solution.

8) Les guitaristes _____ du rock.

9) Mon chat _____ en rampant.

10) L'élève _____ tranquillement.

11) Les enfants _____ un plan.

12) L'athlète s'_____ tous les jours.

13) Le groupe vert _____.

14) L'équipe de football _____.

15) Les handballeurs s'_____.

La liste de phrases à compléter :

1) Les ouvriers travaillent vite.
2) La troupe de théâtre s'entraine.
3) Le pirate cherche un trésor.
4) La petite fille joue du tamtam.
5) La classe de CE2 travaille.
6) Les correspondants arrivent demain.
7) Toute l'école cherche la solution.
8) Les guitaristes jouent du rock.
9) Mon chat arrive en rampant.
10) L'élève travaille tranquillement.
11) Les enfants cherchent un plan.
12) L'athlète s'entraine tous les jours.
13) Le groupe vert arrive.
14) L'équipe de football joue.
15) Les handballeurs s'entrainent.

Annexe 10 : **Exercice le chiffre des unités**

Prénom :

Pour chaque nombre, entoure le chiffre des unités

1)	5390	7)	4,8	13)	9,4
2)	1,632	8)	81,48	14)	1,56
3)	67,1	9)	47	15)	94
4)	2852	10)	717,3	16)	7,65
5)	66,04	11)	374	17)	440,6
6)	6,474	12)	19,7	18)	201

Annexe 11 : Les problèmes arithmétiques à contenus verbaux

Prénom :

Résous les problèmes suivants :

1) Jean a 15 BD. Mélanie a 5 BD de plus que Jean. Combien de BD a Mélanie ?
   Mélanie a _____ BD.

2) Roméo a 6 jeans. Il a 3 jeans de moins qu'Estelle. Combien de jeans a Estelle ?
   Estelle a _____ jeans.

3) Florian a 9 crayons. Virgile a 4 crayons de plus que Florian. Combien de crayons a Virgile ?
   Virgile a _____ crayons.

4) Rayan a 16 romans. Il a 6 romans de plus que Tom. Combien de romans a Tom ?
   Tom a _____ romans.

5) Louise a 5 jupes. Manon a 2 jupes de moins que Louise. Combien de jupes à Manon ?
   Manon a _____ jupes.

6) Juliette a 8 feutres. Elle a 3 feutres de plus que Thomas. Combien de feutres a Thomas ?
   Thomas a _____ feutres.

7) Hélène a 14 fraises. Charles a 7 fraises de plus que Hélène. Combien de fraises a Charles ?
   Charles a _____ fraises.

8) Baptiste a 20 dessins. Jeanne a 16 dessins de moins que Baptiste. Combien de dessins a Jeanne?
   Jeanne a _____ dessins.

9) Laurène a 10 euros. Elle a 5 euros de moins que Tiphaine. Combien d'euros a Tiphaine ?
   Tiphaine a _____ euros.

10) Nathan a 15 bananes. Il a 8 bananes de plus que Jérémie. Combien de bananes a Jérémie ?
   Jérémie a _____ bananes.

11) Esteban a 15 coloriages. Il a 11 coloriages de moins que Mia. Combien de coloriages a Mia ?
   Mia a _____ coloriages.

12) Arthur a 8 pièces. Paul a 3 pièces de moins qu'Arthur. Combien de pièces a Paul ?
   Paul a _____ pièces.

Annexe 12 : Script de l'intervention exécutive à la résolution de problèmes arithmétiques à contenus verbaux

Instructions bleues sont réservées à l'expérimentateur

I. Cours théorique

« On va travailler sur la résolution de problèmes dans lesquels il faut effectuer soit une addition, soit une soustraction. Lorsque l'on réalise une addition, on ajoute un nombre à l'autre, on fait par exemple « 5 + 3 = 8 » (Montrer la carte addition-soustraction, côté recto, figure 1). Lorsque l'on réalise une soustraction, on retire un nombre à un autre, on calcule une différence ou un écart. Par exemple « 5 – 3 = 2 ». Pour résoudre ce type de problèmes correctement, il faut commencer par réfléchir à l'opération que l'on doit réaliser. » Retourner la carte addition-soustraction, côté verso, et dire : « Par exemple, dans le problème « Pierre a 5 billes. Il a 3 billes de plus que Luc. Combien de billes a Luc ? », il faut faire une soustraction car Luc a moins de billes que Pierre. Pour trouver la bonne opération, il ne faut pas hésiter à se faire « le film du problème » dans sa tête, à visualiser la situation et donc à réorganiser le problème. Si Pierre a 3 billes de plus que Luc, cela veut dire que c'est lui qui a le plus de billes, et Luc qui en a le moins. Cela signifie donc que Luc a 3 billes de moins que Pierre. Il faut donc faire une soustraction pour trouver la bonne réponse. »

« Mais attention, dans certains cas, il est difficile de trouver quelle est l'opération à réaliser. Par exemple dans cet énoncé, certains enfants disent qu'il faut faire une addition car il y a le mot « plus ». On se trompe parce qu'on a l'habitude de faire une addition quand on entend « plus », et une soustraction quand on entend le mot « moins » dans l'énoncé. Cette habitude peut nous influencer dangereusement. On croit que ça nous aide, alors qu'en réalité on tombe dans un piège. Pour déterminer quelle opération choisir, il faut faire bien attention aux mots utilisés et se représenter la situation dans sa tête et essayer de réorganiser le problème, en se demandant qui a le plus de billes. »

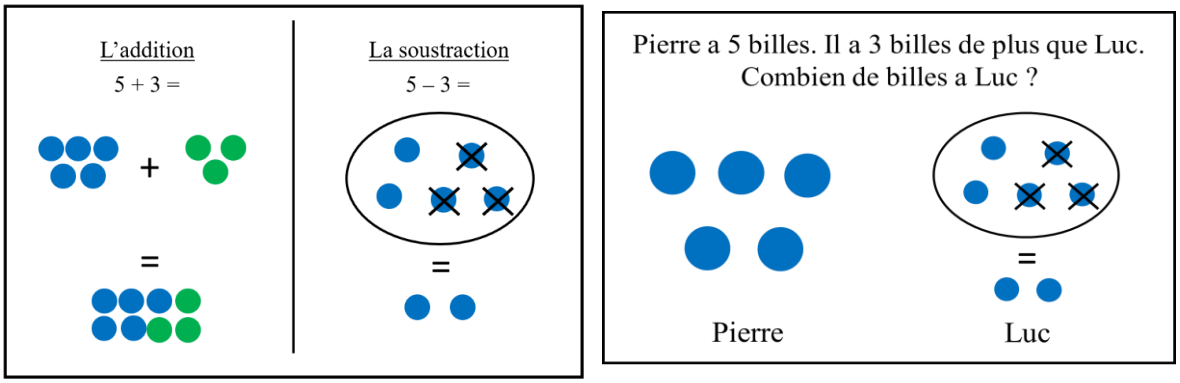


Figure 1, carte addition – soustraction (recto-verso)

II. Manipulation

On propose à l'élève un problème à résoudre. Ils doivent déterminer quelle opération réaliser pour résoudre le problème : « Léo a 8 billes. Il a 4 billes de moins que Max. Combien Max a-t-il de billes ? ». Pour cela, il dispose de deux cartons-réponse : "Soustraction" et "Addition" (voir figure 3). On lui montre la carte-énoncé du problème (voir figure 2, coté recto, ci-dessous).

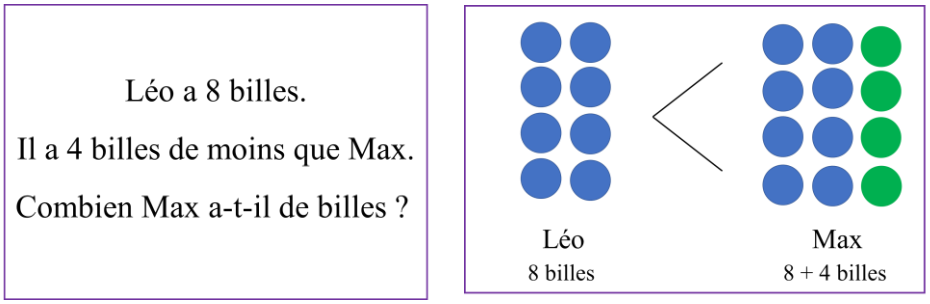


Figure 2, Carte-énoncé recto – verso

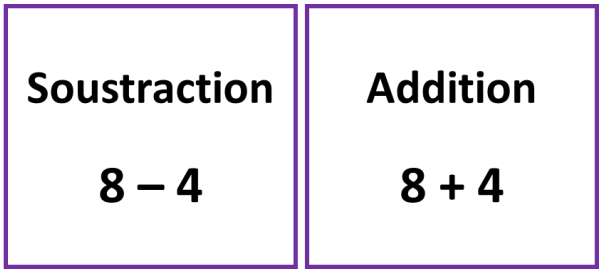


Figure 3, Les deux cartons-réponse

1. Première phase

Présenter les deux cartons-réponse à l'élève et dire « Maintenant tu vas utiliser les deux cartons que je t'ai donné pour répondre. Si tu penses qu'il faut effectuer une soustraction, tu me montres le carton soustraction. Si tu penses qu'il faut effectuer une addition, tu me montres le carton addition. Tu as bien compris ? » Répéter les instructions si nécessaire.

Montrer le problème, côté recto et le lire (voir figure 2). « A ton avis, faut-il effectuer une addition ou une soustraction. Montre-moi le carton » Si l'élève réussit dire « Bravo ». S'il se trompe, dire « Comme toi, certains enfants se trompent et disent qu'il faut choisir une soustraction. C'est une mauvaise solution ! Je t'explique. Rappelle-toi, il faut se demander qui a le plus de billes et réorganiser le problème. Ici, Léo a 4 billes de moins que Max. C'est donc Max qui a le plus de billes. Max a 4 billes de plus que Léo (retourner la carte-énoncé) : il faut choisir l'addition.

Dans ce problème, la source de l'erreur vient de l'habitude que l'on a de faire une addition dès qu'on entend le mot « plus » et une soustraction dès qu'on entend le mot « moins ». Attention, rappelez-vous, dans certains cas, cela nous fait tomber dans un piège. Pour ne pas tomber dans le piège, il faut donc visualiser le problème, comprendre qui a le plus de billes, réorganiser le problème et choisir la bonne opération.

Pour mieux te faire comprendre on va étudier ensemble les différentes possibilités en éliminant les erreurs, pour parvenir à la bonne réponse. »

2. Deuxième phase

Présenter à l'élève la seconde partie du matériel expérimental (voir figure 4, attrape-piège). Une planche transparente hachurée représente les processus d'inhibition, et la partir centrale, non hachurée représente le processus d'activation. Les cartes réponses sont de nouveau proposées.

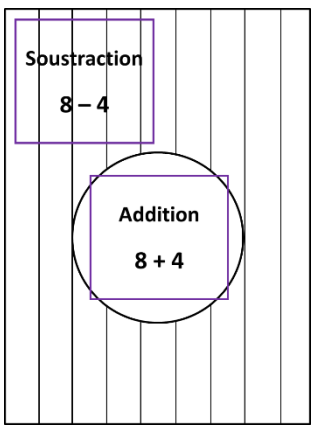


Figure 4 – Attrape-piège complété

Montrer l'attrape-piège et dire « Ça c'est un attrape-piège. On va y mettre les différentes réponses inscrites sur les cartons. Sous les hachures, on va mettre les mauvaises réponses, celles-qui font tomber dans le piège. Les bonnes réponses, on va les placer sur le rond au centre.

Commençons par la réponse « soustraction ». Dans le cas de cette réponse, on croit que c'est simple et on ne regarde que le mot « moins » dans l'énoncé : c'est le piège dont on a parlé. Donc, pour ne pas tomber dans le piège, il faut glisser cette réponse sous les hachures car c'est une mauvaise solution. Je te rappelle, regarder uniquement les mots « plus » et « moins » utilisés dans l'énoncé ne suffit pas, il faut visualiser la situation, réorganiser l'énoncé et choisir la bonne opération. En conclusion, il ne faut pas tomber dans le piège « croire que c'est simple et prêter attention uniquement aux mots « plus » ou « moins » utilisés ». Montrer la carte « addition » et dire : si on fait bien attention au nombre de billes de départ, on voit que la bonne réponse est « addition ». On pose donc cette réponse sur le cercle au milieu de l'attrape-piège, où il n'y a pas de hachure.

On va maintenant essayer avec de nouveaux exemples ».

Faire passer les 3 autres exemples :

- Louise a 6 cartes. Elle a 4 cartes de moins qu'Olivier. Combien de cartes a Olivier ? (exemple bleu)
- Éric a 7 fleurs. Il a 3 fleurs de plus que Pauline. Combien de fleurs a Pauline ? (exemple rouge)
- Paul a 4 pommes. Il a 2 pommes de plus que Laurie. Combien de pommes a Laurie ? (exemple vert)

Annexe 13 : Script de l'intervention contrôle à la résolution de problèmes arithmétiques à contenus verbaux

Les instructions bleues sont réservées à l'expérimentateur.

I. Cours théorique

« On va travailler sur la résolution de problèmes dans lesquels il faut effectuer soit une addition, soit une soustraction. Lorsque l'on réalise une addition, on ajoute un nombre à l'autre, on fait par exemple « 5 + 3 = 8 » (Montrer la carte addition-soustraction côté recto, figure 1). Lorsque l'on réalise une soustraction, on retire un nombre à un autre, on calcule une différence ou un écart. Par exemple « 5 – 3 = 2 ». Pour résoudre ce type de problèmes correctement, il faut commencer par réfléchir à l'opération que l'on doit réaliser. » Retourner la carte addition-soustraction, côté verso, et dire : « Par exemple, dans le problème « Pierre a 5 billes. Il a 3 billes de plus que Luc. Combien de billes a Luc ? », il faut faire une soustraction car Luc a moins de billes que Pierre. Pour trouver la bonne opération, il ne faut pas hésiter à se faire « le film du problème » dans sa tête, à visualiser la situation et donc à réorganiser le problème. Si Pierre a 3 billes de plus que Luc, cela veut dire que c'est lui qui a le plus de billes, et Luc qui en a le moins. Cela signifie donc que Luc a 3 billes de moins que Pierre. Il faut donc faire une soustraction pour trouver la bonne réponse. »

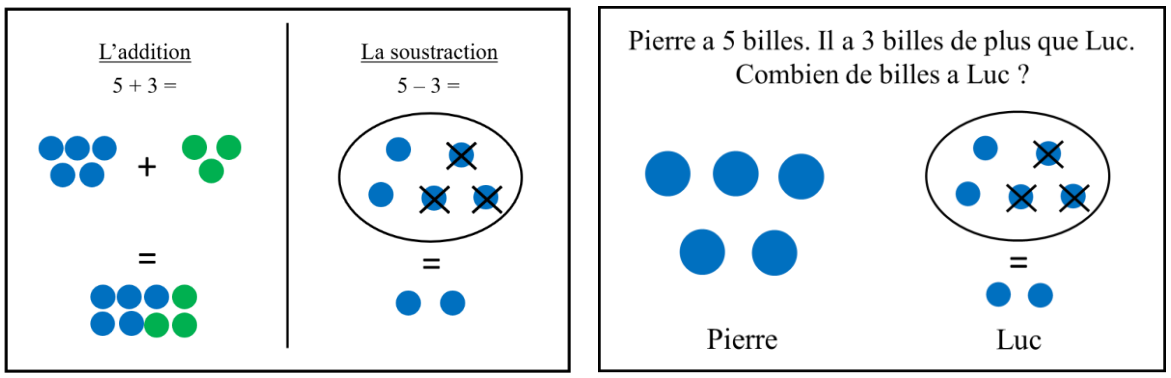


Figure 1, carte addition – soustraction (recto-verso)

II. Manipulation

On propose à l'élève un problème à résoudre. Ils doivent déterminer quelle opération réaliser pour résoudre le problème : « Léo a 8 billes. Il a 4 billes de moins que Max. Combien Max a-t-il de billes ? ». Pour cela, il dispose de deux cartons-réponse : "Soustraction" et "Addition" (voir figure 3). On lui montre la carte-énoncé du problème (voir figure 2, coté recto, ci-dessous).

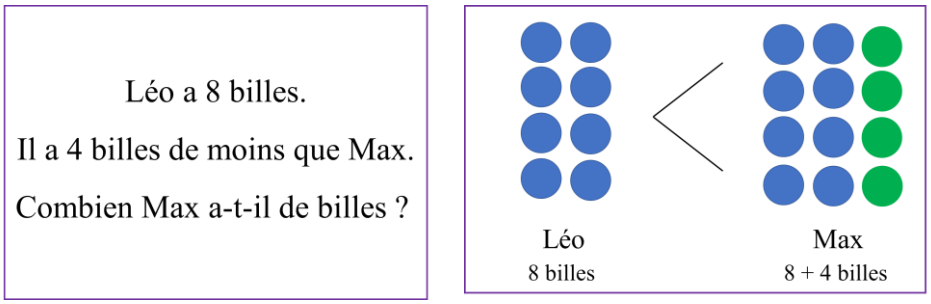


Figure 2, Carte-énoncé recto-verso

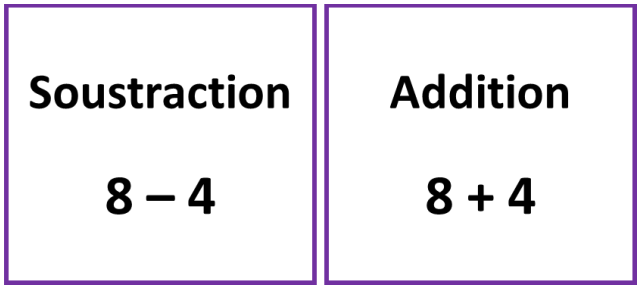


Figure 3, Les deux cartons-réponses

1. Première phase

Présenter les deux cartons-réponse à l'élève et dire « Maintenant tu vas utiliser les deux cartons que je t'ai donné pour répondre. Si tu penses qu'il faut effectuer une soustraction, tu me montres le carton soustraction. Si tu penses qu'il faut effectuer une addition, tu me montres le carton addition. Tu as bien compris ? » Répéter les instructions si nécessaire.

Montrer le problème, côté recto et le lire (voir figure 2). « A ton avis, faut-il effectuer une addition ou une soustraction. Montre-moi le carton » Si l'élève réussit dire « Bravo ». S'il se trompe, dire « Comme toi, certains enfants se trompent et disent qu'il faut choisir une soustraction. C'est une mauvaise solution ! Je t'explique. Rappelle-toi, il faut se demander qui a le plus de billes et réorganiser le problème. Ici, Léo a 4 billes de moins que Max. C'est donc Max qui a le plus de billes. Max a 4 billes de plus que Léo (retourner la carte-énoncé) : il faut choisir l'addition.

Pour mieux te faire comprendre on va étudier ensemble les différentes possibilités en éliminant les mauvaises réponses, pour parvenir à la bonne réponse. »

2. Deuxième phase

Présenter à l'élève la seconde partie du matériel expérimental (voir figure 4, boîte à réponses). Une planche transparente divisée en deux parties : la partie du haut pour les bonnes réponses et la partie du bas pour les mauvaises réponses. Les cartes réponses sont de nouveau proposées.

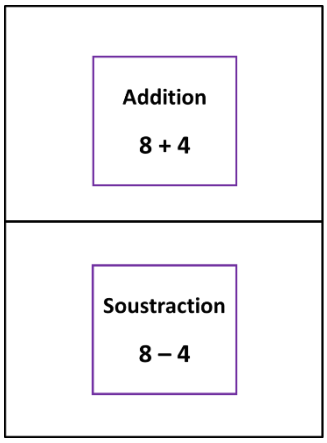


Figure 4 – Boîte à réponses complétée

Montrer la boîte à réponses et dire « ça c'est une boîte à réponses. Au-dessus de la ligne, on va mettre la bonne réponse. En dessous de la ligne, on mettra la mauvaise réponse.

Commençons par la réponse « Soustraction ». C'est une mauvaise solution, car comme on l'a vu si Léo à 4 billes de moins que Max, ça veut dire que Max a plus de billes que Léo. On met donc la carte sous la ligne dans la boîte à réponses. Montrer la carte « soustraction » et dire : si on réorganise bien l'énoncé comme on vient de le faire, on voit que la bonne réponse est « addition ». On met donc cette réponse dans la partie du haut.

On va maintenant essayer avec de nouveaux exemples ».

Les trois autres exemples à manipuler :

- Louise a 6 cartes. Elle a 4 cartes de moins qu'Olivier. Combien de cartes a Olivier ?
- Éric a 7 fleurs. Il a 3 fleurs de plus que Pauline. Combien de fleurs a Pauline ?
- Paul a 4 pommes. Il a 2 pommes de plus que Laurie. Combien de pommes a Laurie ?

Annexe 14 : Script de l'intervention exécutive à la tâche de conservation du nombre

Les instructions bleues sont réservées à l'expérimentateur.

I. Cours théorique :

Disposer devant l'enfant les 7 jetons bleus alignés (cf. Disposition 1). « Regarde, j'ai mis des jetons sur la table ». Demander à l'enfant de compter le nombre de jetons. « Super, maintenant regarde ce que je fais. » Effectuer une première transformation de la rangée en écartant les jetons (cf. Disposition 2) et demandez à l'élève de compter de nouveau les jetons. On fait ensuite une seconde transformation en resserrant les jetons devant l'enfant (cf. Disposition 3). Une fois de plus, demander à l'enfant de compter le nombre de jetons. « Super ! Tu vois, j'ai écarté et resserré les jetons, mais il y en a toujours le même nombre, il y en a toujours 7. » Poser la carte-énoncé « 7 » (voir figure 1).

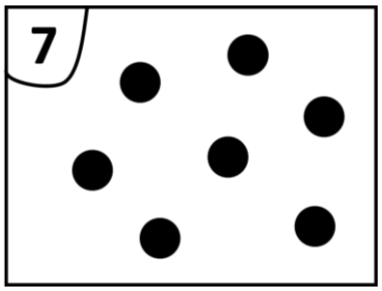


Figure 1, la carte-énoncé 7

« Mais attention, dans cet exercice il y a un piège : on croit souvent qu'il y a plus de jetons quand ils sont écartés. Mais il y en a toujours le même nombre. On se trompe parce qu'on pense que quand c'est plus long, il y en a plus. Cette habitude nous fait tomber dans un piège. Pour réussir, il faut donc faire attention au nombre de jetons et pas à la longueur de la ligne. »

II. Manipulation :

On propose à l'élève une nouvelle configuration de jetons (cf. Disposition 4) et on lui demande s'il y a le même nombre de jetons ou non dans les deux lignes. Il a alors deux cartons-réponse pour répondre « pareil » et « pas pareil » (voir cartons-réponse, voir figure 2).

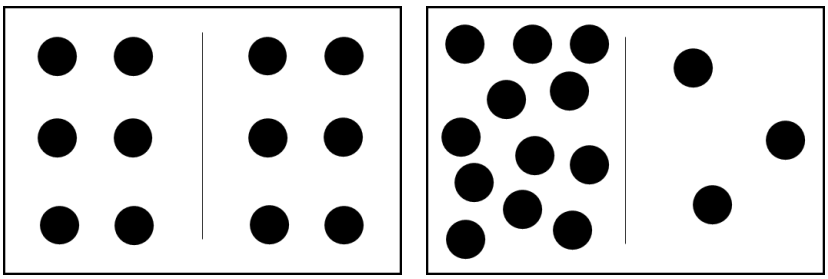


Figure 2, les deux cartons-réponse : pareil, pas pareil

« Maintenant on va faire le même jeu mais avec deux lignes. Tu es prêt ? Tu vas devoir me dire s'il y a le même nombre de jetons dans les deux lignes ou si le nombre de jetons est différent. Si tu veux dire qu'il y a le même nombre de jetons dans les deux lignes, il faut me montrer cette carte qui veut dire « pareil dans les deux lignes » (monter la carte « pareil », figure 2). Par contre, si tu penses qu'il n'y a pas le même nombre de jetons, il faut me montrer cette carte qui veut dire « pas pareil dans les deux lignes » (montrer la carte « par pareil », figure 2). Tu as compris ? Montre-moi la carte qui veut dire « le même nombre de jetons ». Maintenant, montre-moi la carte qui veut dire « pas le même nombre de jetons ». Très bien. » Si l'élève n'a pas compris, réexpliquer.

« On va pouvoir commencer le jeu : ». Faire deux lignes de 7 jetons identiques (cf. Disposition 4). « Est-ce qu'il y a le même nombre de jetons dans les deux lignes ? Est-ce qu'il y a le même nombre, pareil, de bleus et de verts ? Leve le petit carton qui correspond à la bonne réponse. » L'enfant lève son carton-réponse. Il doit reconnaître que les deux lignes de jetons sont identiques en nombre. Une fois que c'est d'accord, écarter la ligne de jetons bleus, sans toucher à la ligne verte (cf. Disposition 5), et demander à l'élève : « Est-ce qu'il y a le même nombre de jetons bleus que de jetons verts ? Est-ce qu'il y a le même nombre de jetons en haut et en bas ? (ne pas hésiter à pointer du doigt les deux lignes) ». L'enfant montre son carton-réponse.

Première phase :

Si l'enfant réussit, dire « Bravo ». Si l'enfant échoue, dire « Tu t'es trompé et comme toi certains enfants se trompent et disent qu'il n'y a pas le même nombre de jetons sur les deux lignes. C'est une mauvaise réponse, je t'explique. Rappelle-toi, pour répondre, il faut prendre en compte le nombre de jetons sur la ligne. Je n'ai ni ajouté, ni retiré de jetons. Je les ai juste écartés. Il y a toujours 7 jetons dans les deux lignes (montrer la carte-énoncé, figure 1) ».

« On se trompe parce qu'on pense que quand c'est plus long, il y en a plus. C'est le piège dont je parlais tout à l'heure. Pour réussir, il faut que tu fasses attention au nombre de jetons. Pour mieux te faire comprendre on va regarder ensemble les différentes réponses en enlevant les mauvaises réponses, celles qui font tomber dans le piège, pour trouver la bonne réponse. »

Deuxième phase :

Présenter à l'élève l'attrape-piège (voir figure 3, l'attrape-piège). Une planche transparente hachurée représente les processus d'inhibition, et la partir centrale, non hachurée représente le processus d'activation. Les cartons-réponse sont de nouveau proposées.

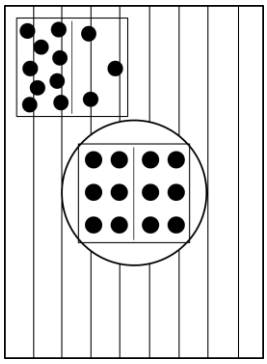


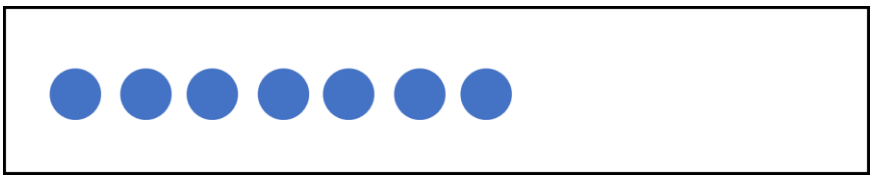
Figure 3 – L'attrape piège complété

Montrer l'attrape piège et dire « ça c'est un attrape-piège. On va glisser la réponse qui nous fait tomber dans le piège sous les hachures, comme dans une prison, et la bonne réponse, on va la poser sur le rond au milieu. Commençons par la réponse « pas le même nombre » (montrer la carte-réponse correspondante). Ici tu crois que c'est simple et tu ne fais attention qu'à la longueur des lignes, c'est le piège dont on a parlé. Pour ne pas tomber dans le piège, il faut que tu fasses attention au nombre de jetons et pas à la longueur de la ligne. On va donc glisser cette réponse sous les hachures comme dans une prison car c'est la mauvaise réponse (mettre le carton-réponse tous ensemble sous les hachures). »

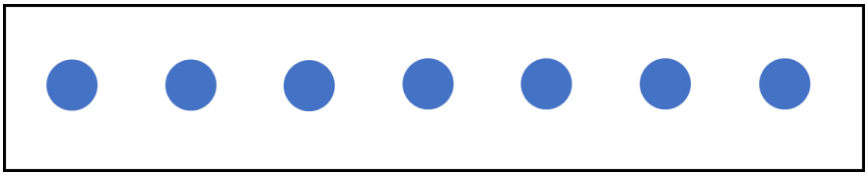
« Si on fait bien attention au nombre de jetons dans les deux lignes, on voit que la bonne réponse est « le même nombre de jetons » (montrer la carte-réponse « même nombre de jetons »). On pose donc cette carte sur le rond du milieu car c'est la bonne réponse (poser le carton « même nombre de jetons » dans le centre, et demander à l'élève de le faire). »

Les différentes dispositions :

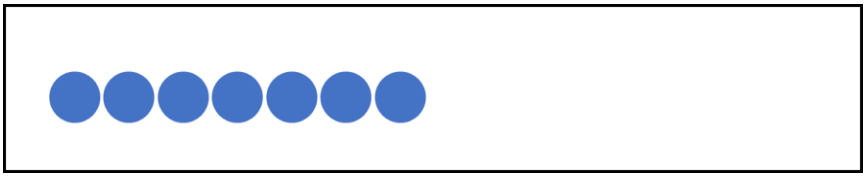
Disposition 1



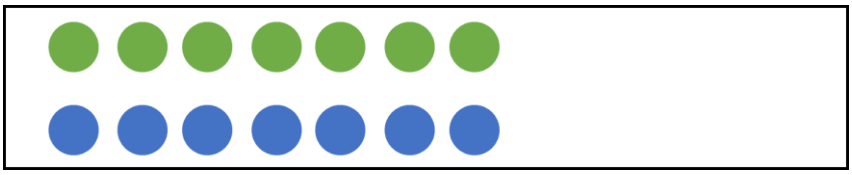
Disposition 2



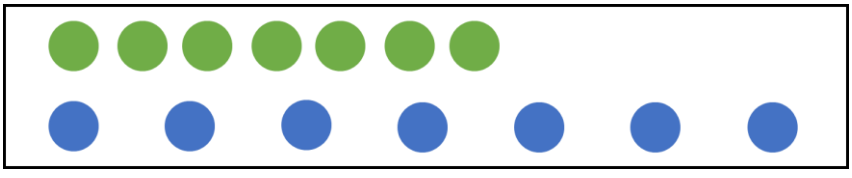
Disposition 3



Disposition 4



Disposition 5



Annexe 15 : Script de l'intervention contrôle à la tâche de conservation du nombre

Les instructions bleues sont réservées à l'expérimentateur.

I. Cours théorique :

Disposer devant l'enfant les 7 jetons bleus alignés (cf. Disposition 1). « Regarde, j'ai mis des jetons sur la table ». Demander à l'enfant de compter le nombre de jetons. « Super, maintenant regarde ce que je fais. » Effectuer une première transformation de la rangée en écartant les jetons (cf. Disposition 2) et demandez à l'élève de compter de nouveau les jetons. On fait ensuite une seconde transformation en resserrant les jetons devant l'enfant (cf. Disposition 3). Une fois de plus, demander à l'enfant de compter le nombre de jetons. « Super ! Tu vois, j'ai écarté et resserré les jetons, mais il y en a toujours le même nombre, il y en a toujours 7. » Poser la carte-énoncé « 7 » (voir figure 1).

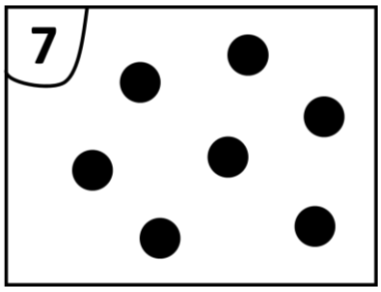


Figure 1, la carte-énoncé 7

II. Manipulation :

On propose à l'élève une nouvelle configuration de jetons (cf. Disposition 4) et on lui demande s'il y a le même nombre de jetons ou non dans les deux lignes. Il a alors deux cartons-réponse pour répondre « pareil » et « pas pareil » (voir cartons-réponse, voir figure 2).

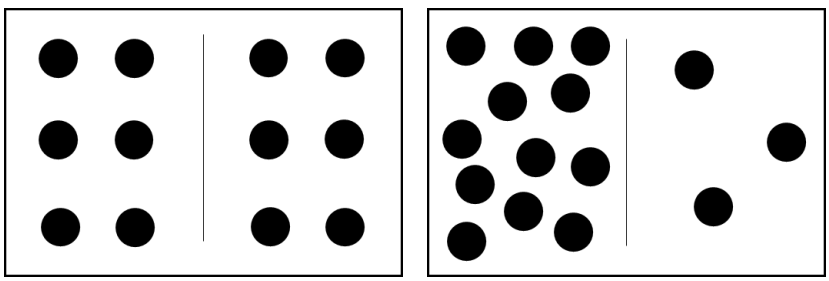


Figure 2, les deux cartons-réponse : pareil, pas pareil

« Maintenant on va faire le même jeu mais avec deux lignes. Tu es prêt ? Tu vas devoir me dire s'il y a le même nombre de jetons dans les deux lignes ou si le nombre de jetons est différent. Si tu veux dire qu'il y a le même nombre de jetons dans les deux lignes, il faut me montrer cette carte qui veut dire « pareil dans les deux lignes » (monter la carte « pareil », figure 2). Par contre, si tu penses qu'il n'y a pas le même nombre de jetons, il faut me montrer cette carte qui veut dire « pas pareil dans les deux lignes » (montrer la carte « par pareil », figure 2). Tu as compris ? Montre-moi la carte qui veut dire « le même nombre de jetons ». Maintenant, montre-moi carte qui veut dire « pas le même nombre de jetons ». Très bien. » Si l'élève n'a pas compris, réexpliquer.

« On va pouvoir commencer le jeu : ». Faire deux lignes de 7 jetons identiques (cf. Disposition 4). « Est-ce qu'il y a le même nombre de jetons dans les deux lignes ? Est-ce qu'il y a le même nombre, pareil, de bleus et de verts ? Montre-moi le petit carton qui correspond à la bonne réponse. » L'enfant montre son carton-réponse. Il doit reconnaître que les deux lignes de jetons sont identiques en nombre. Une fois que c'est d'accord, écarter la ligne de jetons bleus, sans toucher à la ligne verte (cf. Disposition 5), et demander à l'élève : « Est-ce qu'il y a le même nombre de jetons bleus que de jetons verts ? Est-ce qu'il y a le même nombre de jetons en haut et en bas ? (ne pas hésiter à pointer du doigt les deux lignes) ». L'enfant montre son carton-réponse.

Première phase :

Si l'enfant réussit dire « Bravo ». S'il échoue, dire « Tu t'es trompé et comme toi certains enfants se trompent et disent qu'il n'y a pas le même nombre de jetons sur les deux lignes. C'est une mauvaise réponse, je t'explique. Rappelle-toi, pour répondre, il faut prendre en compte le nombre de jetons sur la ligne. Je n'ai ni ajouté, ni retiré de jetons. Je les ai juste écartés. Il y a toujours 7 jetons dans les deux lignes (montré la carte-énoncé, figure 1).

Pour mieux te faire comprendre on va regarder ensemble les différentes réponses en enlevant les mauvaises réponses celles qui font tomber dans le piège, pour trouver la bonne réponse. »

Deuxième phase :

Présenter à l'élève la boîte à réponses (voir figure 4, la boîte à réponses). Une planche transparente divisée en deux parties : la partie du haut pour les bonnes réponses et la partie du bas pour les mauvaises réponses. Les cartes réponses sont de nouveau proposées.

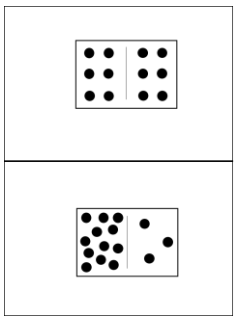


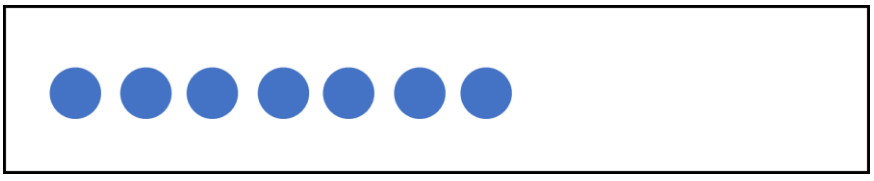
Figure 4 – Boîte à réponses complétée

Montrer la boîte à réponses et dire ça c'est une boîte à réponses. Au-dessus de la ligne, on va mettre la bonne réponse. En dessous de la ligne, on mettra la mauvaise réponse.

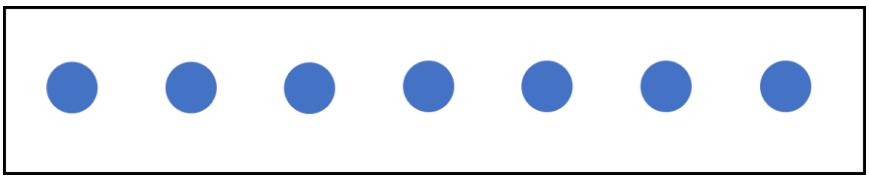
Commençons par la réponse « pas le même nombre » (montrer la carte-réponse correspondante). C'est une mauvaise réponse car comme on l'a vu, les deux lignes ont le même nombre de jetons, même si elles n'ont pas la même longueur. On met donc cette carte en bas de la boîte à réponses, en dessous de la ligne (mettre le carton sous les hachures). Si on regarde bien le nombre de jetons dans les deux lignes, on voit que la bonne réponse est « le même nombre de jetons ». On met donc le carton-réponse en haut de la boîte à réponses (mettre le carton « même nombre de jetons » en haut de la boîte à réponses, et demander à l'élève de faire la même chose).

Les différentes dispositions :

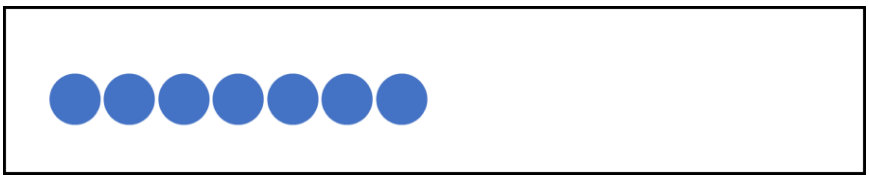
Disposition 1



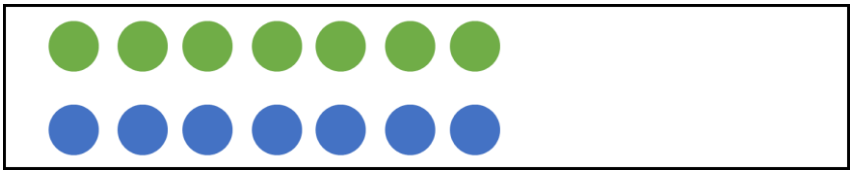
Disposition 2



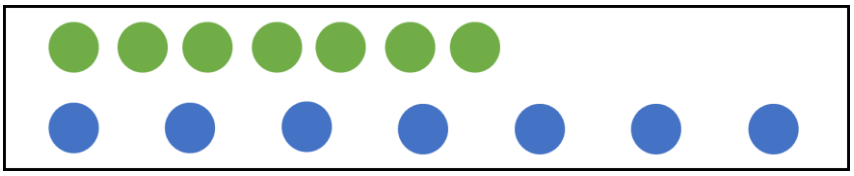
Disposition 3



Disposition 4



Disposition 5



Annexe 16 : **Couverture et sommaire de Létang, M., & Garbarg-Chenon, J. (2020).** ***Entrainer le cerveau à résister – Coffret – Non-lecteurs*****. Nathan.**



Sommaire

Préface 5

Éléments théoriques et principes pédagogiques 9

A Les neurosciences de l'éducation 9
La plasticité cérébrale, le recyclage neuronal 10
La mémorisation et la consolidation des apprentissages 10
L'attitude de l'élève : engagement actif, correction des erreurs, émotions et curiosité 11
Le contrôle exécutif : automatisation, contrôle inhibiteur et attention 12

B Le contrôle inhibiteur 13
Les trois systèmes cognitifs du cerveau 13
- Système 1 heuristique et système 2 algorithmique 13
- Système 3 contrôle inhibiteur 14

Pourquoi travailler le contrôle inhibiteur en classe ? 15

C Une pédagogie prenant en compte le principe du contrôle inhibiteur 16
Parler du cerveau 16
Entrainer le contrôle inhibiteur 17
Cibler une heuristique particulière 17
Adopter une posture métacognitive 18
Vivre la démarche au quotidien 19

1 À la découverte de mon cerveau 21

PS/ MS - Séquence 1 : Les 5 sens 23
Séance 1 : L'ouïe 23
Séance 2 : La vision 24
Séance 3 : Le gout 24
Séance 4 : L'odorat 25
Séance 5 : Le toucher 26

PS/ MS - Séquence 2 : Le cerveau 27
Séance 1 : Qu'est-ce que le cerveau ? 27
Séance 2 : Le rôle du cerveau 29

GS/CP - Séquence 1 : Découvrir son cerveau 31
Séance 1 : Ce que je connais de mon cerveau 31
Séance 2 : À quoi ressemble mon cerveau ? 32
Séance 3 : À quoi sert mon cerveau ? 33

GS/CP - Séquence 2 : Le cerveau et les apprentissages 34
Séance 1 : Mon cerveau apprend 34
Séance 2 : Mon cerveau peut se tromper 36
Séance 3 : Je peux entrainer mon cerveau 37

2 Champion de l'inhibition 39

A La démarche de l'entrainement 39
Des activités courtes, motivantes, évolutives et adaptables 39
Une pratique régulière et ritualisée 40
Un enseignement explicite et structuré 40
Une réflexion métacognitive 40
Une inscription dans le quotidien de la classe au service des apprentissages 43
Une démarche favorisant l'engagement actif de l'élève 43

B Les jeux 43
Quelques principes 43
Différentes pratiques 44
À vous de jouer ! 44

C La mise en œuvre en classe 44
Inclure les jeux dans le quotidien de la classe 44
Introduire l'entrainement 44
Pratiquer un nouveau jeu 47
Progression et programmation 47
- Programmation et progression sur un an 48
- Programmation et progression sur deux ans 49

D Utilisation des fiches jeux 51

JEUX 52

JEUX EN ATELIER

À la ferme 52
Anibataille 54
Complète la phrase 56
Gare aux fourmis 58
Les visages 60
Ni oui ni non 62
Les points de vue 64
Le tri mystère 66

JEUX MOTEURS

1,2,3 Soleil 68
Le code couleur 70
La course arrêtée 72
Déménager 74
Les déplacements 76
Jacques a dit 78
Les jeux collectifs 80
L'âne têtu 82
La traversée 84
Les mouches 86
Le miroir 88
Les parcours codés 90
Les parcours piégés 92
Partir en voyage 94
Top départ 96
Tous ensemble 98

JEUX INDIVIDUELS

Anitaille 100
Dans le même sens (1) 102
Dans le même sens (2) 104
Les drôles d'animaux 106
Les formes emboitées 108
Quel est le plus grand ? 110

JEUX EN REGROUPEMENT

Le chant (1) 112
Le chant (2) 114
Le furet 116
L'animal muet 118
Les contraires 120
Les rythmes 122
La salade de fruits 124
Tête ou pieds ? 126

3 La chasse aux pièges 129

A Principes généraux 129
L'ambivalence de l'heuristique 129
Apprivoiser les heuristiques en classe 129

B La chasse aux pièges dans la classe 130
Découvrir et comprendre 130
S'appuyer sur l'entrainement au contrôle inhibiteur 131
Transférer dans l'ensemble des apprentissages 131
- Lors de la préparation de la classe 131
- Changer les habitudes 132
- Chasser les pièges et les analyser 132

C L'attrape-piège 132
Le dispositif 133
Usage collectif 133
Usage en remédiation petits groupes 134

D Mise en œuvre au sein d'une séquence pédagogique 135
Chasse aux pièges : analyse a priori 135
Chasse aux pièges : présentation explicite de l'heuristique 135
Attrape-piège collectif 136
Chasse aux pièges dans la classe : les « erreurs intéressantes » 136
Attrape-piège individuel : différenciation 136
Trace écrite incluant la chasse aux pièges 137

Annexes 138
Les formes emboitées, fiches individuelles 138
Quel est le plus grand ?, fiches individuelles 141

@

RENDEZ-VOUS SUR LE PORTAIL Lea.fr

Lea.fr → Travail collaboratif → Lab' pédagogique

Vous pourrez y découvrir toutes les ressources mises à votre disposition :

- **Outils pour les séquences pédagogiques** : poster, comptine, personnages à découper, schémas, vignettes…
- Cartes des jeux À la ferme, Ani(ba)taille, Gare aux fourmis, Les visages.
- **Cartes-images** pour les jeux Le tri mystère, Le code couleur, Le chant (1), L'animal muet, Les contraires, La salade de fruits, Tête ou pieds ?
- **Fiches enseignant, élève et étiquettes** pour les jeux Complète la phrase, Ni oui ni non, Dans le même sens (1), Dans le même sens (2), Drôles d'animaux, Les formes emboitées, Quel est le plus grand ?

Annexe 17 : **Couverture et sommaire de Garbarg-Chenon, J., & Létang, M. (2020).** ***Entrainer le cerveau à résister – Coffret – Lecteurs*****. Nathan.**



Sommaire

Préface 5

Éléments théoriques et principes pédagogiques 9

A Les neurosciences de l'éducation 9
La plasticité cérébrale, le recyclage neuronal 10
La mémorisation et la consolidation des apprentissages 11
L'attitude de l'élève : engagement actif, correction des erreurs, émotions et curiosité 12
Le contrôle exécutif : automatisation, contrôle inhibiteur et attention 12

B Le contrôle inhibiteur 13
Les trois systèmes cognitifs du cerveau 13
- Système 1 heuristique et système 2 algorithmique 13
- Système 3 contrôle inhibiteur 14

Pourquoi travailler le contrôle inhibiteur en classe ? 15

C Une pédagogie prenant en compte le principe du contrôle inhibiteur 16
Parler du cerveau 16
Entrainer le contrôle inhibiteur 17
Cibler une heuristique particulière 17
Adopter une posture métacognitive 18
Vivre la démarche au quotidien 19

1 À la découverte de mon cerveau 21

Séquence 1 : Connaitre le cerveau 22
Séance 1 Mon cerveau, je m'en sers tout le temps 22
Séance 2 Comment fonctionne mon cerveau ? 23
Séance 3 Que se passe-t-il quand j'apprends ? 26
Séance 4 Ce que je sais du cerveau qui apprend 29

Séquence 2 Connaitre le principe du contrôle inhibiteur 30
Séance 1 Découvrir 30
Séance 2 Comprendre et représenter 32
Séance 3 S'approprier et réinvestir 34

2 Champion de l'inhibition 37

A La démarche de l'entrainement 37
Des activités courtes, motivantes, évolutives et adaptables 37
Une pratique régulière et ritualisée 38
Un enseignement explicite et structuré 38
Une réflexion métacognitive 38
Une inscription dans le quotidien de la classe au service des apprentissages 41
Une démarche favorisant l'engagement actif de l'élève 41

B Les jeux 41
Quelques principes 41
Différentes pratiques 42
À vous de jouer ! 42

C La mise en œuvre en classe 45
Inclure les jeux dans le quotidien de la classe 45
Introduire l'entrainement 45
Pratiquer un nouveau jeu 46
Progression et programmation 47
- Programmation et progression sur un an 47
- Programmation et progression sur deux ans 47

D Utilisation des fiches jeux 50

JEUX 52

JEUX DE CARTES 52

À la ferme 52
Attrape le totem 54
La bataille vitesse 56
Gare aux fourmis 58
Les mots interdits 60
Le tri mystère 62
Les trois couleurs 64

JEUX COLLECTIF 66

L'alphabet 66
Les calculs 68
Le chant (1) 70
Le chant (2) 72
Le furet 74
L'animal muet 76
Les contraires 78
Ni oui ni non 80
La salade de fruits 82
Silence Bougie 84
1, 2, 3 Soleil 86

JEUX MOTEURS 88

Le code couleur 88
La course arrêtée 90
Jacques a dit 92
Les jeux collectifs 94
L'âne têtu 96
Les mouches 98
La traversée 100
Le miroir 102
Partir en voyage 104
Top départ 106
Tous ensemble 108

JEUX INDIVIDUELS 110

Cercle ou carré ? 110
Complète la phrase 112
Grand ou petit ? 114
La lettre muette 116
Quel est le plus grand ? 118
Quelle couleur ? 120

3

3 La chasse aux pièges 123

A Principes généraux 123
L'ambivalence de l'heuristique 123
Apprivoiser les heuristiques en classe 123

B La chasse aux pièges dans la classe 124
Découvrir et comprendre 124
S'appuyer sur l'entrainement au contrôle inhibiteur 125
Transférer dans l'ensemble des apprentissages 125
- Lors de la préparation de la classe 125
- Lors de l'appropriation d'une notion 125

C L'attrape-piège 126
Le dispositif 126
Usage collectif 128
Usage en remédiation petits groupes 128

D Mise en œuvre au sein d'une séquence pédagogique 128
Chasse aux pièges : analyse a priori 129
Chasse aux pièges : présentation explicite de l'heuristique 129
Attrape-piège collectif 129
Chasse aux pièges dans la classe : les « erreurs intéressantes » 129
Attrape-piège individuel : différenciation 130
Trace écrite incluant la chasse aux pièges 137

Annexes 138
Fiches individuelles (jeu et score) pour les jeux Ni oui ni non, Cercle ou carré?, Complète la phrase, Grand ou petit? La lettre muette, Quel est le plus grand?, Quelle couleur ?

@

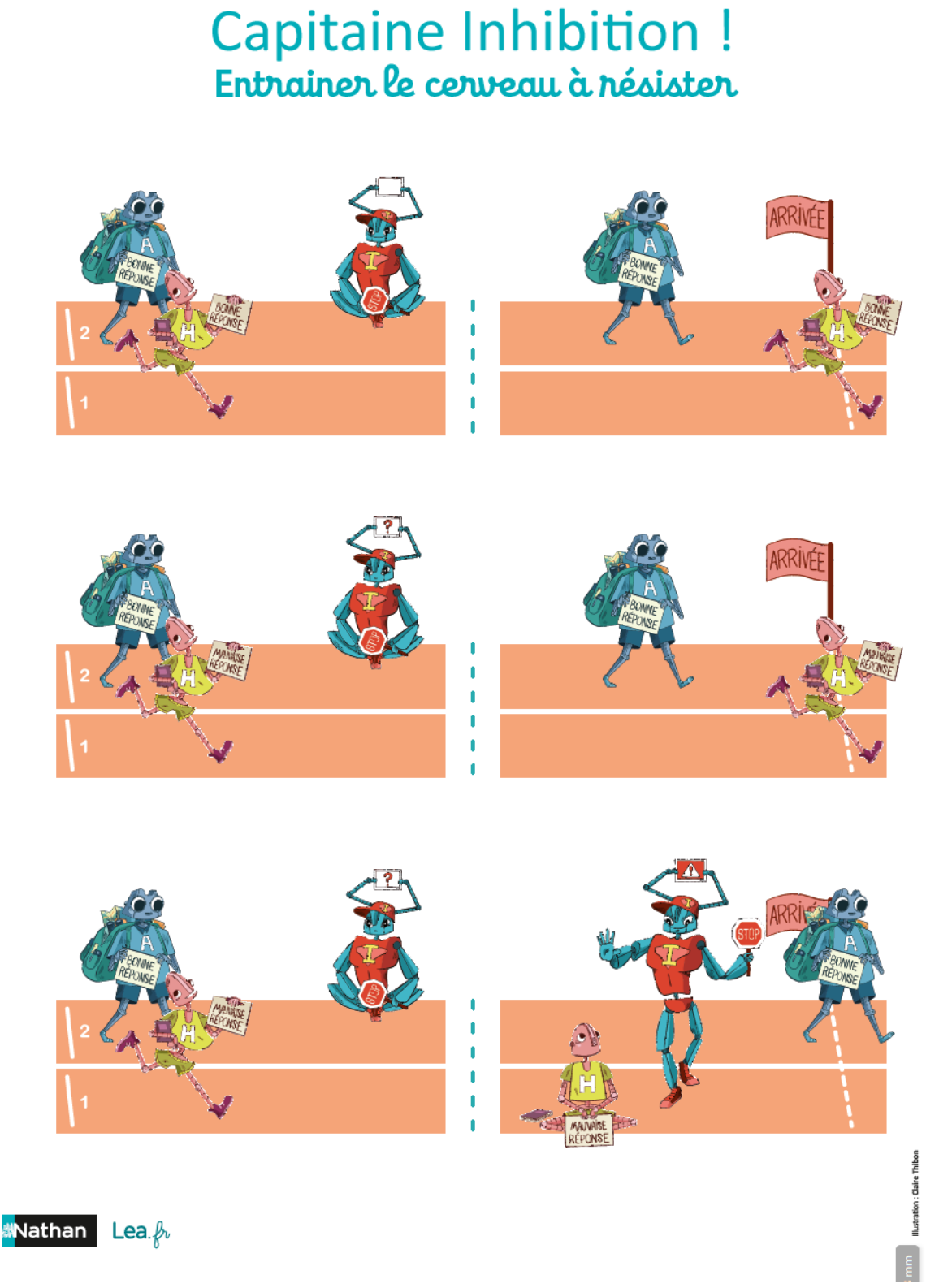
RENDEZ-VOUS SUR LE PORTAIL Lea.fr

Lea.fr → Travail collaboratif → Lab' pédagogique

Vous pourrez y découvrir toutes les ressources mises à votre disposition :

- **Outils pour les séquences pédagogiques :** poster, personnages, schémas, vignettes, affiche...
- **Cartes des jeux** À la ferme, Attrape le totem, La bataille vitesse, Gare aux fourmis, Les mots interdits, Le tri mystère, Les trois couleurs.
- **Cartes-images pour les jeux** Le chant (1), L'animal muet, Les contraires, Silence / Bougie, Le code couleur.
- **Fiches élèves et/ou enseignants pour les jeux** Ni oui ni non, Cercle ou carré ?, Complète la phrase, Grand ou petit ?, La lettre muette, Quel est le plus grand ?, Quelle couleur ?

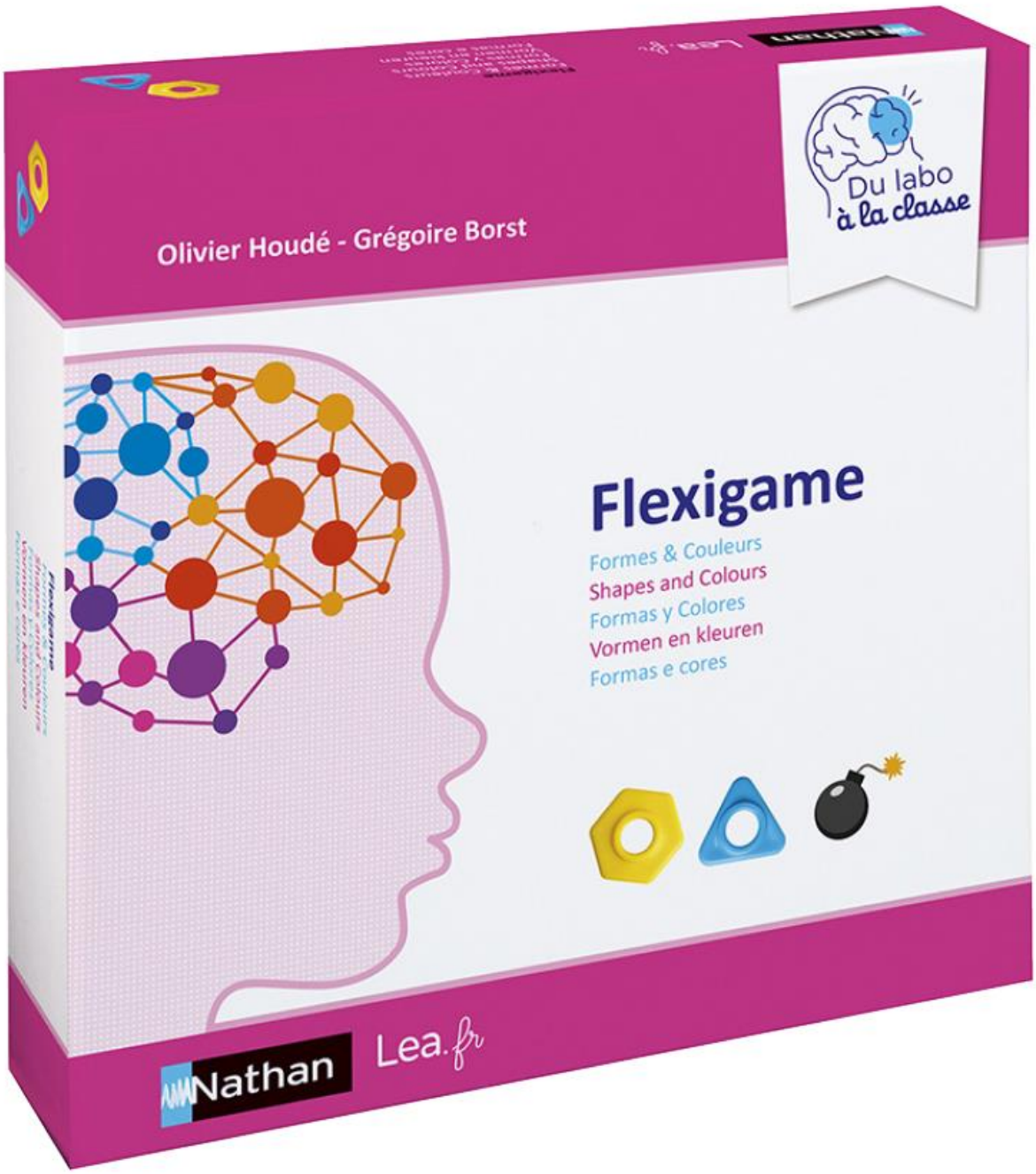
Annexe 18 : **Poster « Capitaine Inhibition ! Entrainer le cerveau à résister »**



Annexe 19 : **Couvertures des trois jeux Flexigame issus de la collection « Du labo à l'école »**




Olivier Houdé - Grégoire Borst
Du labo à la classe
Flexigame
Fruits, Légumes & Couleurs
Fruits, Vegetables and Colours
Frutas, Verduras y Colores
Fruit-groenten en kleuren
Frutas-legumes e cores
Nathan
Lea.fr


Olivier Houdé - Grégoire Borst
Du labo à la classe
Flexigame
Formes & Couleurs
Shapes and Colours
Formas y Colores
Vormen en kleuren
Formas e cores
Nathan
Lea.fr

Annexe 20 : Programme des six séances pédagogiques proposées aux élèves de la 6ème à la 3ème

SÉANCES PÉDAGOGIQUES	S1 - Qu'est-ce qu'un cerveau ?	S2 - Que se passe-t-il dans mon cerveau lorsque j'apprends ?	S3 -Comment mon attention fonctionne-t-elle ?	S4 - Comment mes mémoires fonctionnent-elles ?	S5 - Comment puis-je résister à mes automatismes ?	S6 - Comment mes émotions peuvent-elles influencer mes apprentissages ?
OBJECTIFS	Découvrir le cerveau : son aspect et ses principales fonctions	Découvrir le neurone et la plasticité cérébrale	Montrer que l'attention filtre, qu'elle est limitée et qu'elle peut être détournée	Découvrir les différentes mémoires et le processus de mémorisation	Comprendre le rôle de l'inhibition	Comprendre le rôle des émotions et leur influence dans les apprentissages
DÉROULÉ		Réactivation de la S1	Réactivation des S1 et S2	Réactivation de la S1 à S3	Réactivation de la S1 à S4	Réactivation de la S1 à S5
	Représentation du cerveau par l'élève (fin du pré-test) Qu'est-ce qu'un cerveau ? Comment le cerveau est-il composé ? Comment peut-on voir dans la tête ? A quoi le cerveau sert-il ?	Représentation de l'apprentissage par les élèves Qu'est-ce qu'un neurone ? Comment les informations circulent-elles ? Qu'est-ce que la plasticité cérébrale ?	Représentation de l'attention par les élèves Qu'est-ce que l'attention ? Qu'est-ce qu'un distracteur ? Peut-on réaliser deux tâches en même temps ?	Représentation de la mémorisation par les élèves Que signifie mémoriser ? Comment faire pour mémoriser à long terme ? Quel est le rôle du sommeil dans le processus de mémorisation ?	Qu'est-ce que l'inhibition ? Comment fonctionnent les trois systèmes de la pensée ? Comment puis-je résister à mes automatismes ?	Représentation des émotions par les élèves Qu'est-ce que l'émotion ? Quel est le rôle des émotions dans les apprentissages ? Pourquoi est-ce si difficile de contrôler ses émotions à l'adolescence ?
	Fiche de mémorisation	Fiche de mémorisation	Fiche de mémorisation	Fiche de mémorisation	Fiche de mémorisation	Fiche de mémorisation

Allers-retours du labo à la classe : Faire de la recherche participative sur le contrôle inhibiteur via la plateforme numérique Lea.fr

Résumé : Chaque jour, nous utilisons des raccourcis de pensée pour répondre rapidement et rester adaptés à notre environnement. Cependant, il arrive que ces stratégies automatiques et intuitives de réponse, ces heuristiques (Kahneman), soient trompeuses. Il est alors nécessaire d'inhiber l'heuristique pour permettre à une stratégie algorithmique plus lente et analytique d'apporter la bonne réponse. Ce contrôle inhibiteur (CI) étant essentiel au quotidien, et plus spécifiquement dans les apprentissages scolaires, de nombreuses études se sont donc intéressées aux différentes façons de le renforcer. Pour autant, aucune de ces études n'a impliqué les enseignants eux-mêmes dans le processus de recherche afin d'évaluer une intervention pédagogique auprès de leurs élèves en classe, alors même que les projets de science participative permettent aujourd'hui de réduire la distance entre chercheurs et non-chercheurs. Ainsi, les objectifs de la présente thèse étaient 1) de montrer qu'il était possible de faire de la recherche participative avec des enseignants en entrainant de façon générale le CI de leurs élèves, 2) de mieux identifier les erreurs heuristiques spécifiques que commettaient les élèves en classe, ainsi que leurs périodes de développement, et 3) de proposer des interventions de type CI ciblées sur ces heuristiques. Les résultats de notre première étude ont permis de montrer qu'une recherche participative en ligne, à grande échelle, était efficace pour améliorer les capacités de CI d'enfants d'âge scolaire et créer un lien entre enseignants et chercheurs. La deuxième étude a permis d'identifier une série nouvelle d'heuristiques scolaires grâce à l'observation des enseignants chez leurs élèves du CE1 au CM2 et de préciser la période à laquelle ils étaient les plus sujets à commettre ces erreurs systématiques. Enfin, les troisième et quatrième études ont montré, de façon complémentaire, qu'un entrainement spécifique du CI dans des problèmes arithmétiques à contenus verbaux chez des élèves d'école primaire (de 7 à 10 ans), ainsi que dans la tâche piagétienne bien connue de conservation du nombre chez des élèves plus jeunes de maternelle, permettait de surmonter leurs erreurs de nature heuristique. C'est à notre connaissance la première recherche participative de ce type.

Mots-clés : Contrôle inhibiteur, Recherche participative, Entrainement, Développement cognitif

From the lab to the classroom: A participatory science project on inhibitory control via the digital pedagogical and collaborative network Lea.fr

Abstract: In their everyday life, people use shortcuts to rapidly respond and adapt to their environment. However, these automatic and intuitive strategies, called "heuristics" (by Kahneman), can sometimes be misleading. In such cases, it is very important to inhibit these heuristics and rather use a slower and more thoughtful algorithmic strategy. The inhibitory control (IC) is daily essential, especially regarding school learnings. Thereby, many studies tried different ways to train this ability. However, none of them involved teachers themselves adopting an experimental method to evaluate the effects of a pedagogical intervention on children in their own classroom, while participatory projects permitted to bridge the gap between researchers and non-researchers. Thus, the aims of the present thesis was 1) to prove that it was possible to conduct a participatory science project with teachers by training IC abilities of school-aged children in their classroom, 2) to identify specific heuristics errors committed by children in their school learnings as well as their respective developmental periods, and 3) to propose IC interventions focused on these heuristics. The results of the first study proved that a large scale online participatory research was efficient to improve school-aged children's IC abilities and to bridge the gap between the lab and the classroom. The second study permitted to identify new school heuristics thanks to teacher's observations of their 2nd to 5th grade pupils and precised the period when they were most prone to make these systematics errors. Finally, in the third and fourth studies, we demonstrated that a specific training of IC both in arithmetic word problems on school-aged children (7 to 10 years-old) and in the well-known Piagetian conservation number task on preschool children, permitted to overcome heuristics errors. To our knowledge, this is the first participatory research of this nature.

Keywords: Inhibitory control, Participatory research, Training, Cognitive Development