



**UNIVERSITÉ
DE GENÈVE**

Archive ouverte UNIGE

<https://archive-ouverte.unige.ch>

Master

2015

Public access

This version of the publication is provided by the author(s) and made available in accordance with the copyright holder(s).

La résolution des additions simples chez l'enfant de 10 ans

Salathe, Laura

How to cite

SALATHE, Laura. La résolution des additions simples chez l'enfant de 10 ans. Master, 2015.

This publication URL: <https://archive-ouverte.unige.ch/unige:76159>

© This document is protected by copyright. Please refer to copyright holder(s) for terms of use.

Last deposit update in Archive ouverte UNIGE on 15.03.2023 00:42



**UNIVERSITÉ
DE GENÈVE**

FACULTÉ DE PSYCHOLOGIE
ET DES SCIENCES DE L'ÉDUCATION

Mémoire de Maîtrise Universitaire en Logopédie

La résolution des additions simples chez l'enfant de 10 ans

PAR

Laura SALATHÉ

Sous la direction du Dr. Catherine THEVENOT

Jury : Dr. Julie FRANCK, Prof. Dirk KERZEL, Dr. Catherine THEVENOT

Juillet 2015

Université de Genève

Faculté de Psychologie et des Sciences de l'éducation

Section de Psychologie

Remerciements

Un immense merci...

...Au Dr. Catherine Thevenot pour avoir encadré ce travail durant deux ans. Je lui suis très reconnaissante en particulier pour sa grande disponibilité, la clarté de ses explications, ses conseils avisés qui ont su guider ma réflexion, tout en restant très pédagogiques.

...Au Dr. Caroline Castel pour sa grande disponibilité, son soutien pour les passations, ainsi que pour son aide précieuse dans le traitement de nos données et les analyses statistiques.

...Au Dr. Sandrine Masson pour le renfort très utile qu'elle nous a apporté lors de la recherche de nos participants.

...Au Dr. Julie Franck et au Prof. Dirk Kerzel pour leur participation en tant que jurés lors de ma soutenance.

...Aux élèves qui ont participé à notre expérience. Merci pour leur enthousiasme, leur patience et leur compliance. Merci aussi à leurs enseignants, pour avoir accepté de bousculer leur programme scolaire à une période chargée de l'année, ainsi qu'aux directeurs pour leur accord quant à la réalisation de ce projet et la mise à disposition des locaux.

...À ma binôme, Sophie Baechler, pour sa présence, son optimisme et son soutien lors de toutes les étapes de ce projet. Merci pour la richesse de nos échanges qui m'ont permis de toujours me remettre en question et de prendre du recul.

...À mes proches, pour leur soutien constant et leurs encouragements. Merci surtout pour le courage qu'ils ont eu de me supporter durant toutes ces années d'études.

Résumé

Il est admis depuis 40 ans qu'au cours du développement, les processus de comptage sont progressivement remplacés par des processus de récupération en mémoire, retrouvés chez l'adulte. De récentes études ont cependant montré que mêmes les adultes utilisaient toujours du comptage pour résoudre des additions simples comme $2+3$. Cette nouvelle conception suggère que le développement se fait dans le sens d'une automatisation des procédures de comptage. La présente étude a pour but de vérifier que les enfants de 10 ans ne récupèrent pas non plus, et que les différences interindividuelles présentes à cet âge reflètent un degré d'automatisation des procédures, tributaire des capacités de mémoire de travail. Nous avons fait passer une tâche de résolutions de petites additions (n'excédant pas la somme de 8) à 37 enfants entre 10 et 11 ans en récoltant leurs réponses avec une clé vocale. Ils ont aussi effectué une épreuve de mémoire de chiffres. Nos résultats indiquent que les modèles soutenant la récupération sont actuellement insuffisants et remettent en question l'utilisation d'indicateurs jusqu'alors interprétés comme le reflet de l'une ou l'autre des stratégies. Ces observations sont corroborées par les données de l'influence de la mémoire de travail, qui apportent aussi du crédit à la conception d'une automatisation des procédures de comptage au cours du développement. Ces résultats ébranlent une conception théorique longtemps dominante dans le domaine de l'arithmétique et pourraient aussi avoir des implications sur le développement pathologique de ces processus, ainsi que sur les moyens de les prévenir ou de les rééduquer.

Table des matières

RÉSUMÉ	3
1. INTRODUCTION	5
1.1 LE DÉVELOPPEMENT DES STRATÉGIES DE RÉOLUTION D'ADDITIONS	6
1.1.1 <i>Les capacités arithmétiques précoces</i>	6
1.1.2 <i>Conception traditionnelle : du comptage à la récupération</i>	7
1.1.2.1 La résolution d'additions chez le jeune enfant.....	7
1.1.2.2 La résolution d'additions à partir de 10 ans jusqu'à l'âge adulte	9
1.1.3 <i>Mémoire de travail et développement des capacités arithmétiques</i>	11
1.1.4 <i>Développement pathologique: la dyscalculie développementale</i>	12
1.1.4.1 Développement des stratégies arithmétiques dans la dyscalculie	13
1.1.4.2 Théorie explicative de la dyscalculie : un déficit de mémoire de travail	14
1.1.5 <i>Critiques et nouvelle conception : vers un comptage automatisé</i>	15
1.1.5.1 La dyscalculie à la lumière de la nouvelle conception	21
1.2 BUTS ET UTILITÉ DE LA PRÉSENTE RECHERCHE.....	22
1.3 HYPOTHÈSES ET PRÉDICTIONS	24
2. MÉTHODE	25
2.1 PARTICIPANTS	25
2.2 MATÉRIEL & PROCÉDURE.....	25
2.3 VARIABLES.....	26
3. RÉSULTATS	27
3.1 LECTURE DE CHIFFRES.....	27
3.2 RÉOLUTION D'ADDITIONS	27
3.2.1 <i>Pourcentages de réponses correctes</i>	27
3.2.2 <i>Temps de résolution</i>	28
3.2.2.1 Analyse de l'ensemble du groupe.....	28
3.2.2.2 Analyse selon les scores de mémoire de travail	32
4. DISCUSSION.....	39
4.1 RÉOLUTION D'ADDITIONS À L'ÂGE DE 10 ANS : COMPTAGE OU RÉCUPÉRATION ?	39
4.2 QUID D'UNE ÉVOLUTION PAR COMPTAGE AUTOMATISÉ ? L'INFLUENCE DE LA MDT	45
4.3 CONCLUSIONS	50
4.3.1 <i>Implications théoriques</i>	50
4.3.1.1 Dans le développement normal des capacités arithmétiques.....	50
4.3.1.2 Dans le développement pathologique des capacités arithmétiques	51
4.3.2 <i>Limites de l'étude et perspectives pour la recherche future</i>	52
4.3.3 <i>Implications pratiques pour l'enseignement et la rééducation</i>	55
5. BIBLIOGRAPHIE	57
6. ANNEXES.....	63

1. Introduction

La communauté scientifique s'intéresse depuis plus de quarante ans à la manière dont l'humain procède pour résoudre des opérations arithmétiques, à commencer par la plus simple d'entre elles, et la première découverte par les enfants : l'addition. S'il a été démontré que les enfants ont dès leur plus jeune âge des compétences « protoarithmétiques », il va s'ensuivre une longue période d'apprentissage avant qu'ils ne maîtrisent ce type d'opération aussi bien et aussi rapidement que les adultes. La résolution d'additions simples peut s'effectuer par différentes stratégies qui vont progressivement évoluer au cours du développement de l'enfant jusqu'à l'âge adulte. La conception communément admise durant ces dernières décennies reposait sur une vision telle que celle proposée par Ashcraft (1982), pour qui les processus de comptage étaient progressivement remplacés par des processus de récupération en mémoire, que l'on retrouverait chez l'adulte. Les premières critiques de cette conception n'ont que peu été entendues à l'époque, et ces recherches initiales ont été les bases théoriques sur lesquelles se sont appuyées les explications tant du développement normal que pathologique de cette compétence arithmétique, et à partir desquelles les nouvelles perspectives théoriques et pratiques se sont dessinées. De récentes études (Fayol & Thevenot, 2012; Barrouillet & Thevenot, 2013), à la lumière des méthodologies et technologies plus fines d'aujourd'hui, proposent un point de vue allant à l'encontre de cette perspective. Celles-ci montrent en effet que les processus mis en œuvre chez l'adulte ne correspondraient pas à de la récupération en mémoire, mais bien, toujours et encore, à du comptage. Partant de ce point, les travaux actuellement en cours tendent à montrer que ce n'est dès lors pas non plus le cas chez l'enfant de 10 ans, âge à partir duquel la récupération en mémoire commencerait à prendre place selon la conception traditionnelle. L'une de ces études chez l'adulte a par ailleurs montré des réponses comportementales différentes en fonction des capacités de mémoire de travail, composante cognitive fortement impliquée dans le développement des capacités arithmétiques. Ces travaux, qui ébranlent les bases théoriques concernant le développement normal des processus de calcul, remettent de ce fait également en question les conceptions de son développement pathologique, et par là même les méthodes éducatives ainsi que les applications cliniques en rééducation qui ont été développées à partir de celles-ci.

1.1 Le développement des stratégies de résolution d'additions

1.1.1 Les capacités arithmétiques précoces

La recherche sur les compétences numériques du jeune enfant a longtemps été dominée par la vision piagétienne, qui excluait toute compétence numérique « innée ». Cependant, depuis une vingtaine d'années, les chercheurs ont réalisé d'importantes découvertes chez le très jeune enfant allant à l'encontre des résultats de Piaget, et ce notamment dans le domaine des capacités arithmétiques. Dans ses travaux basés sur un paradigme de violation des attentes, Wynn (1992, 1995) a été l'une des premières à démontrer l'existence de compétences que l'on peut qualifier de « protoarithmétiques » : en effet, ses résultats laissent penser que les bébés de 5 mois déjà s'attendent non seulement à un changement au sein d'une collection à la suite d'une opération (addition et soustraction), mais même à un changement précis de la collection. Sa conception de capacités arithmétiques innées ne fait néanmoins pas l'unanimité. Premièrement, ses observations n'ont pas toujours été répliquées (e.g., Wakeley, Rivera & Langer, 2000, cité par Rousselle, 2005). Deuxièmement, d'autres chercheurs ont expliqué les réactions des bébés observées dans son expérience comme découlant de mécanismes moins élaborés que le calcul, tels que ceux retrouvés dans la représentation mentale (Uller & al., 1999, cité par Rousselle, 2005), ou comme résultant d'une préférence pour les caractéristiques des stimuli (familiarité, complexité) (Cohen & Marks, 2002, cité par Rousselle, 2005).

Hugues (1981) observe que des enfants de 3 à 4;6 ans dénombrent correctement une collection à la suite d'ajouts ou de retrait d'éléments tant que le résultat n'excède pas 3 et que l'opération est réalisée avec un support concret, même sans voir l'état final de la collection. La résolution de petites opérations est donc possible tant que les quantités peuvent être associées à des représentations externes comme les doigts ou des cubes. Pour Starkey (1992), la compréhension d'une transformation apparaîtrait même vers 18 mois déjà, mais cette compétence ne va pas au-delà de 3 éléments.

Bryant et al. (1999, cité par Rousselle, 2005) observent que la connaissance de certaines propriétés des opérations (e.g., la compréhension du principe d'inversion) apparaît dès 5 ans. Ils concluent donc que c'est à cet âge-là que s'effectuerait le passage d'un traitement en action des transformations à un traitement symbolique des opérations. En effet, selon ces auteurs, les connaissances conceptuelles et procédurales sont deux acquisitions indépendantes qui ne vont pas forcément de pair : on peut savoir faire sans avoir compris ce qu'on fait. Ainsi, ce n'est qu'à partir de 5-6 ans, quand les deux sortes de connaissances sont présentes, que l'on peut parler de traitement symbolique des opérations, soit de véritables opérations arithmétiques.

1.1.2 Conception traditionnelle : du comptage à la récupération

1.1.2.1 *La résolution d'additions chez le jeune enfant*

Comme cela a été présenté dans la section précédente, les capacités de résolution d'additions commencent à se développer bien avant l'entrée à l'école, de manière précoce et spontanée. Ce n'est pas le cas pour d'autres opérations, en particulier la multiplication, qui nécessite un apprentissage explicite, fourni par la scolarisation. Avant tout apprentissage, la résolution de problèmes additifs simples s'effectuerait à l'aide du comptage (Baroody & Ginsburg, 1986) par le biais de moyens externes tout d'abord, comme des objets ou les doigts. Ce comptage serait ensuite progressivement internalisé par l'enfant, pour ne devenir plus qu'exclusivement verbal (Siegler & Shrager, 1984).

En 1972, Groen et Parkman suggèrent que les procédures de comptage passent par différentes étapes de maturation, qui tendent vers la stratégie de résolution la plus économique en termes de temps et la moins coûteuse en termes de ressources cognitives. Ces stratégies consisteraient en différentes manières de fixer les opérands sur une ligne numérique mentale et d'incrémenter, soit de déplacer un curseur, jusqu'au résultat correspondant. L'enfant débiterait avec la stratégie du Compter-tout, impliquant le dénombrement de chaque opérande en commençant par 1 pour chacun. À partir du moment où il réalise qu'il n'est pas obligé de dénombrer chaque opérande, mais qu'il peut compter à partir de l'un des deux, il utiliserait la stratégie dite de Compter-à-partir-de. À ce stade, deux stratégies sont possibles : la stratégie du Minimum ajouté et celle du Maximum ajouté, soit respectivement de compter à partir du plus grand des deux opérands ou à partir du plus petit. La stratégie du Minimum (ou stratégie du Min) est la plus optimale des deux, puisqu'en partant du plus grand opérande, l'incrémentation est minimale : elle correspond au plus petit des deux opérands. Cette stratégie est donc plus rapide et plus fiable. Dans leur étude, Groen et Parkman présentaient à des enfants et des adultes des additions dont le résultat n'excédait pas 9. Leur but était d'observer quel modèle de comptage était le plus à même de refléter les performances de leurs participants. Ils ont observé que le meilleur prédicteur des temps de résolution variait en fonction de l'âge des participants. À 6-7 ans, le meilleur prédicteur (avec 70% de variance expliquée) correspondait à la magnitude du plus petit des deux opérands pour les additions n'impliquant pas de doubles. Précisons que les opérations doubles sont toutes les opérations à deux opérands identiques (e.g., $1+1$, $2+2$, $3+3$, $4+4$ etc.). Cela était ainsi l'indication d'un recours à la stratégie du Min pour les opérations non-doubles. Avant cet âge par contre, le meilleur prédicteur était le résultat de l'opération, soit l'incrémentation maximale, qui implique de recompter chaque terme, comme c'est le cas dans

la stratégie du Compter-tout. À partir de ces observations, ils ont proposé un modèle de développement : le modèle du Min. Selon sa conception, l'évolution des procédures de comptage se traduirait par un passage de l'utilisation de la stratégie Compter-tout à la stratégie du Minimum ajouté. Les auteurs observent également un changement au niveau des temps de résolution des additions en fonction de l'âge. Un modèle de comptage, quel qu'il soit, implique une incrémentation. Plus les opérandes seront grands, plus le nombre de pas à réaliser pour aboutir à la somme sera élevé et ainsi, plus les temps de résolution seront importants. Ce phénomène, soit l'accroissement proportionnel des temps de résolution (TRs) en fonction de la taille du problème, est appelé l'effet de taille. S'il est très visible chez les enfants (410 ms à chaque incrémentation supplémentaire), ces auteurs observent néanmoins un élément qui vient complexifier cette interprétation: il n'y a pas d'effet de taille pour les opérations doubles. Ces calculs présentent des TRs non seulement très constants mais aussi beaucoup plus courts que les autres. Groen et Parkman suggèrent alors qu'ils sont résolus par récupération en mémoire, leur forme étant facile à encoder et à mémoriser. De plus, ils observent chez les adultes que l'effet de taille est toujours présent, mais fortement atténué : la pente est de 20 ms à chaque augmentation de la taille du minimum ajouté. Ces deux observations conduisent les auteurs à penser que les adultes utilisent un mixte entre des procédures de comptage et de récupération en mémoire : ils privilégient la récupération en mémoire mais en cas d'échec, ils font appel à du comptage, ce qu'ils estiment à 5 % des cas.

L'étude de Groen et Parkman (1972) a été la première à montrer une évolution des stratégies de résolution d'opérations arithmétiques en fonction de l'âge. Cette découverte a deux implications fortes : non seulement il existe différentes stratégies de résolution, mais en plus on peut les utiliser plus ou moins fréquemment en fonction de leur efficacité, leur rapidité, leur précision, paramètres qui sont progressivement découverts au cours du développement. Partant de ce constat, Siegler a alors proposé en 1996 son modèle de « chevauchement de vagues » (*Overlapping Wave Model*) pour rendre compte d'une manière générale du développement des capacités en arithmétique. L'idée principale de ce modèle est d'abandonner la notion de « stade » et de considérer plutôt qu'à un même âge, différentes stratégies sont utilisées dans des proportions différentes. Le développement consiste ainsi en une modification de la fréquence d'utilisation des stratégies. Un tel modèle permet d'expliquer l'existence d'une variabilité intra-individuelle, qui est en elle-même le facteur explicatif principal du développement : parmi ce set de stratégies, l'enfant peut les comparer, déduire quelle est la plus efficace et en acquérir de nouvelles. Groen et Resnick (1977) observent justement ces transitions successives : l'enfant

découvre progressivement les aspects inutiles d'une technique de comptage et peut ainsi simplifier sa stratégie pour la rendre plus optimale.

Quels sont justement ces changements de stratégies qui s'effectuent au cours du développement ? Siegler et Robinson (1982) observent le répertoire des différentes stratégies d'enfants entre 4 et 5 ans sur base d'enregistrements vidéo. Jusqu'à 4 ans, cinq stratégies sont relevées : le comptage digital, le comptage digital à partir de 1, le comptage verbal à partir de 1, la devinette et une stratégie pour laquelle aucune réponse comportementale autre que la restitution très rapide du résultat n'est observée. Les auteurs considèrent cette dernière stratégie comme étant de la récupération en mémoire. La stratégie du Min telle que celle décrite par Groen et Parkman (1972) apparaît vers 5 ans, tout comme les premières décompositions verbales (e.g., pour résoudre $8 + 5$ on peut effectuer le raisonnement suivant : « $8 + 2 = 10$, et $5 - 2 = 3$, donc $10 + 3 = 13$ »). Entre 5 et 7 ans, Siegler (1987) observe que les enfants utilisent le plus souvent deux voire trois stratégies : dans un tiers des cas, il s'agit de la stratégie du Min, dans un second tiers la stratégie qualifiée de récupération en mémoire.

Si l'on se penche sur l'exécution des stratégies utilisées pour les problèmes additifs, on observe entre 5 et 7 ans une amélioration de la vitesse de résolution (Barrouillet & Fayol, 1998 ; Lemaire et al., 1996 ; Logan & Klapp, 1991). Cela est dû à une sélection de stratégies de plus en plus efficaces, mais aussi à une automatisation des processus maintenus.

1.1.2.2 La résolution d'additions à partir de 10 ans jusqu'à l'âge adulte

C'est à la fin des années 1970 qu'émerge l'idée qu'en devenant adulte, nous utiliserions en grande majorité une stratégie de récupération en mémoire pour résoudre une petite addition. Cette idée avait déjà été amorcée par les interprétations de Groen et Parkman (1972), mais à partir de ce moment, les chercheurs ont essayé d'expliquer de quelle manière et à quel moment se faisait ce passage. La stratégie de récupération en mémoire se mettrait progressivement en place grâce à la confrontation répétée du calcul avec son résultat. Petit à petit les deux éléments seraient associés en mémoire à long terme (MLT), par le même processus que celui décrit par Logan (1988) dans sa théorie des cas : l'accumulation de confrontations à de mêmes cas conduirait à un stockage en mémoire de la solution, ce qui permettrait de la retrouver de manière plus directe et plus rapide. La trace mnésique étant renforcée au fil des présentations, cela expliquerait l'expertise développée par les adultes par rapport aux enfants.

En 1978, Ashcraft et Battaglia reprennent l'expérience de Groen et Parkman (1972) en faisant passer une tâche de vérification d'additions à des adultes. Ils implémentent en plus dans leur paradigme une nouvelle notion selon laquelle le résultat d'une addition peut être plus ou

moins raisonnable (e.g., 3 est un résultat plus plausible pour $1+2$ que 7), ceci pouvant avoir une influence sur les TRs : le sujet sera plus rapide pour invalider une réponse très éloignée de la solution par rapport à une réponse ne différant que de ± 2 du résultat correct. Ils observent que, pour les additions non-doubles au résultat « raisonnable », le meilleur prédicteur des TRs n'est ni le minimum, ni la somme des opérandes, mais plutôt le carré de la somme des opérandes.

Ashcraft et Fierman (1982) répliquent la précédente étude chez des enfants âgés entre 9 et 11 ans, issus de trois niveaux scolaires, toujours avec un paradigme de vérification d'opérations. Ils observent que tous les enfants ont de bons scores dans cette tâche, mais qu'ils divergent au niveau de leurs TRs : les enfants du niveau scolaire le plus bas sont moins rapides, moins efficaces que les autres enfants, et l'on observe un fort effet de la taille des opérandes sur les TRs. Néanmoins, ce groupe présente une grande variabilité au niveau des prédicteurs. Les deux groupes d'enfants plus âgés sont quant à eux plus rapides au niveau de leurs TRs, et le meilleur prédicteur est, comme ce qui avait été observé chez les adultes, le carré de la somme des opérandes. De plus leurs patterns de TRs sont aussi plus uniformes. Ils en concluent alors qu'un véritable changement de stratégie est établi à partir de l'âge de 10 ans et que la variabilité des résultats observés chez les enfants les plus jeunes indique que ce changement se met en place à ce moment.

Ainsi, bien que les TRs s'accélèrent avec l'âge, l'effet de taille reste toujours présent, tant chez les enfants de 10 ans que chez les adultes, de manière néanmoins atténuée par rapport aux plus jeunes. Ces auteurs doivent donc proposer a posteriori une explication pour un effet que seuls les modèles de comptage prédisaient jusqu'alors. Groen et Parkman (1972) justifiaient la présence de cet effet par le recours sporadique à une stratégie de comptage, mais Ashcraft et Battaglia (1978) réfutent cette idée. Lorsqu'ils excluent les opérations doubles de leurs analyses, ils obtiennent non pas un effet de taille sous la forme d'un accroissement linéaire des TRs, mais plutôt sous la forme d'une courbe exponentielle. Cela est à mettre en lien avec le fait que le meilleur prédicteur du pattern soit la somme des opérandes au carré. Suite à ce résultat, ils imaginent un modèle de récupération au sein d'une table mentale d'additions. Cette table serait de forme symétrique et carrée, mais étirée vers les sommes plus importantes. Le temps de recherche augmenterait de façon exponentielle selon la longueur de la diagonale à parcourir dans cette table pour retrouver le « nœud » correspondant. Ainsi, ce nouveau prédicteur (la somme des opérandes au carré) est selon eux le signe d'une récupération en mémoire d'un « fait arithmétique » stocké dans une table mentale d'additions.

Reprenant les caractéristiques classiques d'un réseau mnésique, certains auteurs invoquent l'existence d'un effet d'interférence: plus l'on avance vers de grands opérandes dans

cette table d'additions, plus le nombre de combinaisons possibles pour obtenir un certain résultat augmente. Par exemple, si l'on se trouve au début de la table, seul $2+1$ (ou l'opération renversée $1+2$) permet d'aboutir à 3. Si l'on va plus loin dans cette table, la somme de 7 peut par contre être obtenue par $6+1$, $5+2$, $3+4$ (et toutes ces mêmes opérations renversées), soit au total 6 combinaisons possibles. L'activation d'une opération pourrait ainsi activer toutes ces autres combinaisons, qui entreraient en compétition et rallongeraient les TRs (Siegler & Shrager, 1984). Enfin, toujours en considérant les propriétés d'un réseau dans lequel la confrontation répétée à un événement renforcerait la trace mnésique, certains auteurs avancent encore l'existence d'un effet de fréquence : au cours de la création de ce réseau de faits, les enfants rencontreraient plus tôt (Ashcraft & Christy, 1995) et plus souvent (Hamann & Ashcraft, 1986, cité par Barrouillet & Thevenot, 2013) les petites additions par rapport aux autres, les pratiqueraient plus souvent et renforceraient plus souvent ces premiers nœuds dans leur table mentale. Les petites additions auraient donc une trace mnésique plus saillante, et l'accès à ces résultats serait donc plus rapide.

1.1.3 Mémoire de travail et développement des capacités arithmétiques

À ce stade, il semble encore important de revenir sur une composante cognitive étroitement liée au développement des capacités de résolution d'addition : la mémoire de travail (MdT). Il s'agit d'un système mnésique qui permet de retenir temporairement une certaine quantité d'informations spécifiquement pertinentes durant la réalisation d'une tâche. Selon le modèle de Baddeley et Hitch (1974), ce système comporterait trois composantes : la boucle phonologique pour le traitement des informations auditives, le calepin visuo-spatial pour le traitement des informations visuelles et un système exécutif central, responsable de la coordination des deux autres systèmes ainsi que de la gestion de l'attention et du contrôle des stratégies d'encodage et de récupération.

Ce système mnésique va s'améliorer au cours du développement en termes de capacité de stockage (Kail, 1990, cité par Geary, 2005 ; Miller, 1956) mais aussi en termes d'efficacité, notamment par la répétition de l'information par la boucle phonologique (Kreutzer, Leonard & Flavell, 1975). Il va aussi être tributaire de l'amélioration d'autres composantes cognitives plus fondamentales, comme celles évoquées par Cowan et al. dans une revue de littérature de 2002 (e.g., vitesse de traitement de l'information, persistance d'une trace mnésique avant sa désintégration, capacité d'attention et contrôle du focus attentionnel).

La mémoire de travail est un système qui va intervenir tout au long du développement des capacités en arithmétique. Chez l'adulte, Barrouillet et Camos (2007a) citent plusieurs

études montrant que chaque composant de ce système intervient dans la résolution d'opération (e.g., Noël, Désert, Aubrun, & Seron, 2001 ; Heathcote, 1994 ; Lemaire, Abdi et Fayol, 1996). Chez l'enfant, l'étude de Barrouillet et Lépine (2005) présente aussi des résultats très intéressants. Les auteurs font passer à des enfants entre 9 et 10 ans une tâche de résolution d'additions simples. À chaque calcul, ils demandent également à l'enfant comment il pense l'avoir résolu, soit s'il a compté ou s'il a récupéré la solution en mémoire (il s'agit de la méthode des rapports verbaux, qui sera détaillée plus loin). Ils constatent que les enfants avec les plus faibles capacités de mémoire de travail récupèrent plus lentement et moins souvent en mémoire la réponse, et que lorsqu'ils utilisent à la place des stratégies de comptage, ils sont également plus lents et moins précis dans leur réponse. L'étude de Geary et al. (2004) montre par ailleurs une utilisation du comptage digital plus fréquente chez ces enfants et Case, Kurland et Goldberg (1982) observent qu'un empan mnésique faible induit aussi des procédures de comptage ralenties. Partant de ces résultats complémentaires, Barrouillet et Lépine (2005) expliquent leurs observations par le fait que les stratégies de comptage de ces enfants sont encore peu matures et moins rapides. Cela explique l'utilisation plus fréquente du comptage digital pour pallier ce manque de contrôle des procédures. De ce fait, leur lenteur augmente le temps entre l'encodage du calcul et la réponse, ce qui diminue la probabilité que l'association calcul-résultat puisse être mémorisée et transférée en mémoire à long terme. Ils risquent aussi d'arriver moins souvent au bon résultat et la trace mémorielle est ainsi moins renforcée. Cela expliquerait pourquoi ces enfants « récupèrent » moins souvent.

De nombreuses études ont également observé que les enfants dyscalculiques en particulier présentaient de moindres capacités de mémoire de travail, ce qui a d'ailleurs été l'une des explications pour expliquer la majorité de leurs difficultés, et que nous allons développer dans la section suivante.

1.1.4 Développement pathologique: la dyscalculie développementale

Après avoir abordé le développement de la résolution des additions simples chez les enfants tout-venant, nous allons maintenant nous pencher sur le développement pathologique, soit chez les enfants considérés comme dyscalculiques. Temple (1992) définit la dyscalculie développementale comme « un trouble des compétences numériques et des habiletés arithmétiques qui se manifeste chez des enfants d'intelligence normale qui ne présentent pas de déficits neurologiques acquis ». Aujourd'hui, il n'existe pas de critères diagnostiques communément admis, et le terme de dyscalculie n'est d'ailleurs même pas employé de manière universelle pour décrire ce déficit (Rapport de l'INSERM, 2007). Cela rend ainsi le calcul de

sa prévalence difficile à établir, d'autant plus qu'il peut être associé à d'autres troubles, tels que la dyslexie ou encore les troubles de l'attention. Dans le DSM-IV, il fait partie de la catégorie des troubles des apprentissages, au même titre que les troubles de la lecture (dyslexie) et de l'écriture (dysorthographe).

Les difficultés rencontrées par les enfants dyscalculiques s'observent dans plusieurs compétences numériques, et ce de manière relativement précoce. Cela s'observe déjà au niveau de ces connaissances mathématiques informelles qui se développent avant l'entrée à l'école (dénombrement, estimation de quantités, stratégies de résolution d'additions et de soustractions simples). Ce trouble va ainsi toucher les aspects procéduraux mais aussi conceptuels des activités de calcul et de comptage (Rapport de l'INSERM, 2007). Nous allons ici nous intéresser en particulier aux stratégies en arithmétique.

1.1.4.1 *Développement des stratégies arithmétiques dans la dyscalculie*

On doit une grande partie des études réalisées chez les enfants dyscalculiques à Geary. Dans son étude de 1990, il a comparé les stratégies de résolution d'additions simples utilisées par des enfants dyscalculiques de 7 ans par rapport à celles utilisées par des enfants sans trouble du même âge. Il observe que les dyscalculiques ont recours aux mêmes stratégies de comptage que les autres enfants, mais qu'ils utilisent plus fréquemment, plus longtemps durant leur développement et moins fiablement des stratégies de comptage dites immatures. Plus précisément, il observe différentes caractéristiques propres au développement des dyscalculiques. Premièrement, ces enfants utilisent plus longtemps du comptage digital et recourent plus souvent à la stratégie du Compter tout, qui est à cet âge-là immature. Qui plus est, lorsqu'ils comptent de ces manières, ils commettent plus d'erreurs de comptage verbal : cela signifie qu'ils utilisent des méthodes plus « risquées » pour aboutir au résultat correct, et qu'ils ne sont pas pour autant plus performants avec ces méthodes, ils les utilisent même moins bien. Deuxièmement, ces enfants utilisent un nombre plus limité de stratégies, en particulier moins de récupération en mémoire. Troisièmement, lorsque les dyscalculiques récupèrent, les TRs associés sont plus lents, plus variables et comportent plus d'erreurs. Geary et al. (1991) retrouvent ces trois mêmes caractéristiques chez des enfants de 9-10 ans. En outre, ils n'observent pas un passage aussi net du recours à une stratégie de récupération en MLT, comme le prédisent les anciens modèles à cet âge-là. Geary (1990) explique ce phénomène de la manière suivante : selon les modèles classiques, le passage vers la récupération en mémoire se fait par la confrontation répétée d'un calcul à un même résultat. Cette paire finit par être stockée directement en MLT. Or, chez les enfants dyscalculiques, leur lenteur rend l'association calcul-

résultat moins saillante et est donc plus difficile à mémoriser. Par ailleurs, l'immaturation de leurs stratégies et leur moindre maîtrise de celles-ci les conduit à faire plus d'erreurs et à être donc moins souvent confrontés à la bonne association calcul-résultat. Ce déficit de récupération en mémoire est problématique car il s'observe même pour les additions les plus simples et les plus fréquentes (Barrouillet & Lépine, 2005). Par surcroît, ces difficultés semblent persister tout au long de la scolarité, malgré tout type d'entraînement, alors que d'autres sortes d'activités en mathématiques peuvent se développer pratiquement normalement, comme la résolution de problèmes à énoncés verbaux (Jordan & Montani, 1997; Jordan & al., 2003).

1.1.4.2 *Théorie explicative de la dyscalculie : un déficit de mémoire de travail*

Parmi les différentes explications des causes de la dyscalculie, un grand courant considère qu'il s'agit d'un trouble dit secondaire : ce déficit serait l'une des manifestations d'un trouble plus général des fonctions cognitives. Pour expliquer les difficultés dans le domaine de la résolution des opérations arithmétiques, une théorie issue de ce courant apporte des compléments intéressants par rapport aux éléments avancés précédemment : la dyscalculie serait un trouble secondaire lié à un déficit plus général de mémoire de travail (MdT). De nombreuses études rapportent en effet que les enfants dyscalculiques ont de moindres performances en MdT par rapport aux enfants de leur âge, en particulier lors de tâches d'empan de comptage. Hitch et McAuley (1991) observent par exemple que les dyscalculiques sont en difficultés sur les tâches d'empans impliquant du comptage, et ce indépendamment des caractéristiques visuelles ou auditivo-verbales de la tâche. Geary et al. (2004) comparent les performances d'enfants dyscalculiques (certains présentant une dyslexie associée) par rapport à des enfants contrôles de différents niveaux scolaires (1^{ère}, 3^{ème} et 5^{ème} primaire) notamment sur une tâche d'empan de comptage et de résolutions d'additions simples. Ils constatent que, malgré une augmentation progressive de l'empan avec l'âge chez tous les enfants, les dyscalculiques conservent un retard d'environ un an à chaque degré scolaire par rapport à leurs pairs. Au niveau des stratégies de calcul utilisées, les chercheurs remarquent qu'un faible empan de comptage corrèle avec un recours au comptage digital plus fréquent par rapport au comptage verbal et avec un nombre d'erreurs en comptage digital plus important. Ces résultats vont dans le sens de l'hypothèse avancée par Geary (1990) : la stratégie de comptage digitale est plus utilisée chez ces enfants car la représentation des opérands sur les doigts permet de réduire grandement la charge en MdT requise par le processus de comptage.

Des auteurs ont également justifié le fait de ne pas observer de passage clair à une stratégie de récupération en mémoire par un déficit en MdT, en particulier au niveau des

composants de la boucle phonologique et de l'administrateur central. Nous avons évoqué précédemment le problème de la lenteur de calcul chez ces enfants, qui empêche de mémoriser l'association calcul-résultat. Certaines études ont montré que les dyscalculiques ont une vitesse d'articulation des nombres plus lente que leurs pairs, ce qui pourrait être à l'origine d'une dégradation plus rapide de l'information représentée dans la boucle phonologique (Geary & al., 1991, cité par Geary, 2005). Néanmoins, ces effets concernant l'activation de représentations dans le système langagier ne sont pas retrouvés chez tous ces enfants. Il semble que cela se manifeste particulièrement chez ceux qui présentent une dyslexie associée (Geary & al., 1999 ; Geary & al., 2000, cités par Geary, 2005). D'autres auteurs suggèrent plutôt que les difficultés se manifestent au niveau de l'administrateur central, en particulier sur les mécanismes de gestion des interférences. Lorsqu'un calcul apparaît, les enfants dyscalculiques auraient plus de peine à inhiber les informations non-pertinentes par rapport à la résolution de ce calcul, et ces informations vont entrer en compétition avec l'association correcte. Cela va entraîner plus d'erreurs et ainsi diminuer la probabilité d'être toujours confronté à la même association (Barrouillet & al., 1997 ; Geary et al., 2000, cités par Geary, 2005). C'est ce type de mécanismes déficients qui pourraient expliquer la comorbidité de la dyscalculie avec les troubles de l'attention (Gross-Tsur et al., 1996, cité par Geary, 2005).

1.1.5 Critiques et nouvelle conception : vers un comptage automatisé

La vision d'un développement de la résolution des additions évoluant d'une stratégie de comptage vers une stratégie de récupération en mémoire à longterm dominé dans la recherche. Plusieurs réserves, déjà formulées en 1984 par Baroody, peuvent néanmoins être émises. Elles portent sur la conception théorique sous-jacente, les postulats communément admis, la méthodologie utilisée, l'interprétation des données et de la justification de l'effet de taille.

D'un point de vue théorique, une première critique est que le principe de récupération en mémoire dans un réseau de faits arithmétiques, stockés de manière exhaustive, paraît cognitivement peu économique. À l'inverse, une génération du résultat à partir de connaissances procédurales, d'un système de règles, semble nettement plus efficace puisqu'il autorise de nombreuses combinaisons (Baroody, 1984). On peut par exemple faire ici le parallèle avec la linguistique générative, née des travaux de Noam Chomsky à la fin des années 1950. Son idée est que nous n'aurions pas un stock de toutes les phrases que l'on peut dire, mais bien un système de règles et un set d'unités linguistiques qui permettent de générer une infinité de combinaisons entre les mots, soit une infinité de phrases. Pour revenir au domaine des additions, des stratégies autres que la récupération en mémoire et le comptage ont été

décrites dans la littérature, notamment celles impliquant le recours à des règles arithmétiques. De telles stratégies ont été envisagées entre autre pour les additions du type $N+0$ ou $N+1$ (Baroody, 1983, 1984, 1994). Pour cet auteur, l'idée serait que progressivement, au cours de l'apprentissage, des procédures arithmétiques pourraient être exécutées sous forme de règles, de manière automatique. L'individu serait capable d'extraire un principe commun au fil de ses confrontations à un même type de calcul. Typiquement, en comparant $1+0$, $2+0$, $3+0$ ou $2+1$, $4+1$, $5+1$, il réalise qu'ajouter 0 aboutit toujours à un résultat identique au 1^{er} opérande, de même qu'ajouter 1 aboutit toujours au chiffre qui suit l'opérande sur la ligne numérique. Pour Baroody (1983) l'accroissement de la vitesse de résolution des additions qui s'observe au cours du développement pourrait en fait résulter du passage de procédures de comptage plutôt lentes à l'utilisation de connaissances procédurales automatiques, possiblement stockées sous forme de règles. Ce type de stratégie ne serait pas forcément plus lent qu'une récupération en mémoire.

Revenons justement sur un autre point-clé de l'argumentation des défenseurs dans l'ancienne conception, à savoir ce principe selon lequel la résolution par récupération mnésique serait forcément plus rapide que les procédures algorithmiques. Rien ne prouve que ce soit effectivement le cas, surtout quand on mesure des différences entre les stratégies de quelques millisecondes. Baroody (1984) remet en question l'étude de Stazyk, Ashcraft et Fierman (1982) argumentant que la mémoire procédurale est moins performante que la mémoire déclarative, soit le stock de faits arithmétiques : il considère que leurs résultats peuvent être dus à un artefact de la nature de la tâche qu'ils utilisent : une tâche de vérification d'opérations. D'ailleurs, des études plus actuelles, se servant pourtant du même type de tâche, montrent que des connaissances procédurales automatisées peuvent être tout aussi rapides que des connaissances stockées en MLT (e.g., Roussel, Fayol & Barrouillet, 2002).

D'un point de vue méthodologique, on peut également émettre des critiques par rapport au design des précédentes expériences. Premièrement, le protocole utilisé dans les anciennes études (e.g., Ashcraft & Battaglia, 1978 ; Ashcraft & Fierman, 1982) peut être remis en question et l'on peut se demander à juste titre si leurs tâches sont vraiment à même de refléter le processus de résolution en lui-même : ces auteurs mesurent les TRs des participants par un protocole de vérification d'opérations. Cette épreuve inclut un traitement supplémentaire : la prise de décision. Or, les chercheurs ne prennent pas en compte le fait qu'il puisse exister des différences entre les adultes et les enfants à ce niveau (Baroody, 1984). Deuxièmement, l'interprétation des processus sous-jacents à la résolution d'addition s'est jusqu' alors basée sur la mesure de TRs. On effectuait ensuite des analyses de régression pour savoir quel facteur prédisait au mieux le pattern observé. On remarque toutefois que même par cette mesure

pourtant objective, on peine encore à déterminer le temps nécessaire pour chaque stratégie, à cause d'une variabilité inter-sujets élevée. De plus, il s'avère aussi difficile de distinguer les stratégies de comptage et de récupération sur cette seule mesure lorsque les différences observées ne sont que de quelques millisecondes seulement. Pour améliorer cette distinction, certains auteurs ont proposé de compléter leurs mesures objectives par des mesures subjectives : des rapports verbaux. Il s'agit d'auto-évaluations dans lesquelles les sujets indiquent eux-mêmes par quels moyens ils ont abouti au résultat. Ces rapports sont souvent cohérents avec les mesures de TRs, et soutiennent le point de vue d'une récupération en mémoire chez l'adulte : dans leur étude, LeFevre, Sadesky et Bisanz (1996) observent que les adultes rapportent avoir résolu de petites additions par de la récupération en mémoire dans plus de 80% des cas. Mais d'autres auteurs critiquent l'utilisation d'un tel protocole : à partir d'un certain niveau d'automatisation et d'expertise, les procédures de comptage pourraient être si rapides qu'elles en deviendraient inconscientes et de ce fait, le sujet aurait l'impression d'avoir récupéré la réponse en mémoire, alors que ce n'est peut-être pas le cas (Baroody, 1983 ; Ericsson & Simon, 1993). Si les opérations plus grandes sont reportées comme ayant été résolues par comptage, c'est peut-être aussi parce qu'elles sont forcément plus conscientes puisque le sujet doit parfois les décomposer, ce qui prend plus de temps (Fayol & Thevenot, 2012). De manière générale, peut-on vraiment considérer que des stratégies qui se mesurent en quelques centaines de millisecondes atteignent le seuil de notre conscience ? On peut se demander à juste titre s'il est vraiment fiable d'avoir recours aux auto-évaluations pour les petites opérations. Troisièmement, Baroody (1984) reproche à Ashcraft de ne pas s'être intéressé aux différences interindividuelles. Les études ont jusqu'alors utilisé de petits échantillons, et ont obtenu des TRs avec une variabilité importante. Il serait ainsi intéressant de voir sur de plus grands échantillons si cette variabilité persiste et de se demander alors si celle-ci reflète des processus sous-jacents différents, et quelle caractéristique des participants en serait à l'origine.

Concernant l'approche statistique utilisée dans l'analyse des résultats, l'interprétation des patterns de TRs s'est jusqu'alors surtout basée sur la hiérarchie des prédicteurs ressortant d'analyses de régression. Si l'on reprend la justification du modèle de récupération d'Ashcraft et Battaglia (1978), soit que le meilleur prédicteur est le carré de la somme des opérandes, plus que la somme elle-même, on peut leur reprocher, à l'instar de Barrouillet et Thevenot (2013), que ces deux prédicteurs sont, d'un point de vue statistique, presque colinéaires ($r = .97$) et que cette hiérarchie des prédicteurs ne s'appliquait qu'à une partie de leurs opérations.

Au niveau de l'interprétation des résultats, les explications avancées jusqu'alors pour justifier l'effet de taille sont également critiquables. Cet effet, facilement soutenable selon les

modèles de comptage, et a priori non-supposé par les modèles de récupération a néanmoins dû être expliqué par les défenseurs de cette vision. Dans un premier temps, on a supposé qu'il apparaissait à cause d'un recours sporadique au comptage dans les rares cas où la récupération échouait (Groen & Parkman, 1972), et ceci expliquait la fonction linéaire que suivaient les TRs. Des études suivantes ont ensuite invoqué les effets d'interférence et de fréquence pour expliquer le phénomène d'effet de taille, en lien avec la fonction exponentielle suivie par les TRs en fonction de la taille des opérands. Ces effets seraient néanmoins difficilement défendables si l'on s'intéresse uniquement aux petites opérations. Si l'on prend l'effet d'interférence, le nombre de combinaisons possibles augmente effectivement jusqu'à la somme de 10, mais seulement d'une opération supplémentaire quand la somme augmente de 1, ce qui semble peu. En plus, la tendance s'inverse dès la somme de 10. Si la somme de 8 est obtenue par 4 opérations (sans compter les renversées et celles impliquant le 0), seules 3 additions avec 2 opérands à 1 chiffre (sans compter les renversées) aboutissent à la somme de 13. Concernant l'effet de fréquence par exemple, peut-on vraiment dire que $2+4$ est rencontré plus fréquemment que $3+1$, par exemple dans les manuels scolaires? Barrouillet et Thevenot (2013) suggèrent que cet effet a été surestimé dans les précédentes recherches : ils citent notamment une étude réalisée en linguistique par Ferrand et al. (2011), qui observent dans une tâche de décision lexicale que la différence de TRs pour des items de fréquences extrêmement différentes (occurrence de 60 versus 3000 par million de mots) n'est que de 15 ms. La différence de fréquence entre $1+2$ et $3+4$, même si elle existe ne pourra ainsi pas être suffisante pour expliquer l'effet de taille des précédentes études.

Deux récentes études ont dès lors essayé de pallier les faiblesses précédemment évoquées. Elles ont proposé un nouveau regard sur le développement de la capacité de résolution d'additions : ces deux recherches apportent des preuves expérimentales qui soutiennent l'idée que les adultes n'utilisent pas de récupération pour résoudre des additions, même très simples, mais qu'ils comptent, toujours et encore, mais de manière très automatisée.

En 2012, Fayol et Thevenot ont repris la proposition de Baroody (1984) arguant que le recours à des connaissances procédurales automatisées pouvait être très rapide. Ils ont tenté de montrer que c'était là le mécanisme à l'œuvre dans la résolution des plus petites additions. Ces auteurs font passer à des adultes experts (des ingénieurs) une tâche de résolution de calculs dans laquelle leur réponse orale est enregistrée au moyen d'une clé vocale. Il s'agit ainsi d'une tâche de production et non de vérification d'opérations. Ils manipulent le moment où le signe de l'opération apparaît par rapport aux opérands. Le but est de voir si le fait de présenter le signe avant, soit d'annoncer à l'avance la nature de l'opération, rendra les sujets plus rapides dans

leur résolution. L'effet d'amorçage pourrait venir d'une pré-activation d'une procédure, ou d'une pré-activation d'une table particulière de faits arithmétiques. Trois types d'opérations sont proposés : des additions, des soustractions et des multiplications, toutes impliquant des opérands de 1 à 9. Les auteurs observent un effet d'amorçage dans les temps de résolution d'additions simples non-doubles lorsque le signe « + » précède de 150 ms les opérands, et ce même pour les plus petites additions avec des opérands de 1 à 5. Cet effet est retrouvé pour les soustractions, pour lesquelles il est admis qu'il n'y a pas de stock de faits arithmétiques mais bien un recours à des procédures (Dehaene, 1992, cité par Fayol & Thevenot, 2012). Il n'apparaît par contre pas pour les multiplications : elles sont résolues par un processus de récupération mnésique dans un réseau de faits, construit par l'apprentissage explicite des fameuses tables de multiplications (Campbell & Xue, 2001, cité par Fayol & Thevenot, 2012). De tels résultats indiquent néanmoins que la table de faits multiplicatifs n'est pas elle-même pré-activée à l'annonce du signe, vu l'absence d'effet d'amorçage. Les additions seraient donc résolues comme les soustractions mais pas comme les multiplications. Cet effet facilitateur pour les additions reflèterait une pré-activation des procédures de calcul, argument qui va ainsi à l'encontre d'une résolution par récupération en mémoire, même chez l'adulte. Par ailleurs, les auteurs observent que lorsque le signe et les opérands sont présentés simultanément, les participants ont des TRs identiques pour résoudre les additions et les multiplications. Cette observation soutient le fait que la récupération n'est pas forcément plus rapide que le comptage. De plus, cela permet aussi de justifier que la seule observation des TRs n'est pas une donnée suffisante pour déterminer la stratégie sous-jacente. En conclusion quand les adultes additionnent, ils compteraient toujours, sans que cela ne soit pour autant moins rapide que de récupérer en mémoire la solution.

Si l'ampleur des TRs ne suffit pas à déterminer quel processus ils reflètent, il semble ainsi pertinent de voir plutôt comment varient ces TRs et quel autre facteur pourrait moduler leur pattern. En 2013, Barrouillet et Thevenot reviennent quant à eux sur l'interprétation problématique de l'effet de taille et le potentiel effet des différences inter-individuelles. Ils publient une étude en réponse à celle d'Ashcraft et Battaglia (1978), avec une nouvelle méthodologie qui prend en compte les critiques précédemment évoquées. Ces chercheurs proposent à un plus grand échantillon constitué de 92 adultes une tâche de résolution de petites additions simples réalisables avec des opérands de 1 à 4. Il s'agit d'une tâche de production dans laquelle les TRs sont mesurés au moyen d'une clé vocale. Ils leur font aussi passer deux épreuves évaluant leurs capacités de mémoire de travail (MdT), une variable pouvant expliquer les différences inter-individuelles. Les auteurs observent pour les problèmes non-doubles une

augmentation linéaire des TRs en fonction de la magnitude des deux opérandes, le meilleur prédicteur étant la somme des opérandes. Par ailleurs, ils obtiennent des pentes d'environ 20 ms à chaque incrémentation de la taille du premier ou du second opérande, valeur qu'ils jugent inexplicable par un effet de fréquence. La forme du pattern et la valeur de la pente obtenue sont des résultats incompatibles avec un modèle de récupération en mémoire et au contraire, s'expliquent mieux si l'on considère que les adultes utilisent une stratégie de comptage. Concernant les différences interindividuelles, ils font le constat suivant : plus les capacités de MdT sont faibles, plus les réponses sont lentes et l'effet de taille important. En comparant les sujets ayant les meilleures performances de MdT avec ceux ayant les moins bonnes performances, ils remarquent que l'augmentation des TRs ne s'explique pas exactement de la même manière pour les deux groupes : les TRs des meilleurs sont surtout influencés par la taille du deuxième opérande de l'opération (e.g., 4 dans 3+4), alors que les moins bons sont influencés par la taille des deux opérandes. Les auteurs interprètent ces différences comme le recours à une stratégie de comptage différente entre ces groupes : tous utilisent le principe général évoqué par Groen et Parkman (1972), soit de déplacer un curseur sur une ligne numérique mentale. Mais les plus lents doivent rechercher les deux opérandes sur cette ligne, alors que les plus rapides accèdent automatiquement au premier opérande et ne déplacent le curseur que pour le second. En observant ces différences en fonction des capacités de MdT, Barrouillet et Thevenot (2013) proposent ainsi une autre vision du développement des processus algorithmiques : au lieu de passer d'une stratégie de comptage à la récupération, on tendrait au cours du développement vers une automatisation des procédures de comptage, qui s'établirait avec le développement de capacités cognitives plus générales comme la MdT.

Un autre constat observé dans toutes les études réalisées jusqu'à présent, et qui intrigue beaucoup les chercheurs est le cas particulier des opérations doubles, soit les opérations à deux opérandes identiques (1+1, 2+2, 3+3, 4+4 etc.). On remarque en effet que, contrairement aux autres additions, ces calculs sont résolus de manière extrêmement rapide et ne présentent pas d'effet de taille : les TRs des doubles suivent une fonction plate, stable. Ces résultats laissent à croire qu'ils ont un statut spécial. Groen et Parkman (1972) observaient le même phénomène chez les enfants, ce qui les a conduits à supposer que ce sont les seules additions récupérées en mémoire à l'âge de 6-7 ans. Les temps de résolution pour les doubles étant beaucoup plus courts, ils en concluent que la récupération est une stratégie plus rapide que le comptage. Actuellement, deux théories s'opposent pour expliquer la source de cet effet. Certains auteurs estiment qu'il est plus facile d'encoder des opérandes qui se répètent, soit des stimuli visuellement identiques (e.g., Blankenberger, 2001, cité par LeFevre & al., 2004). D'autres

estiment que les opérations doubles ont une représentation mentale plus accessible que les non-doubles. Cet accès mnésique facilité serait là encore dû à des effets de fréquence et d'interférence : on serait plus souvent confronté aux opérations doubles (Ashcraft & Christy, 1995) et on les confondrait moins avec d'autres opérations, car elles sont moins nombreuses (Campbell, 1995, cité par Fayol & Thevenot, 2012). Actuellement, la théorie d'un stockage particulier en mémoire est plus plausible, comme le suggère l'étude de LeFevre et al. (2004) : même avec une présentation « mixte » des opérands (e.g., 4 + QUATRE), les doubles continuent de présenter des TRs inférieurs aux non-doubles présentées dans le même format. Dans les études défendant la nouvelle conception (Fayol & Thevenot, 2012; Barrouillet & Thevenot, 2013), les résultats observés pour les doubles parlent toujours en faveur d'un statut particulier pour ces opérations.

1.1.5.1 *La dyscalculie à la lumière de la nouvelle conception*

À notre connaissance, aucune étude n'a jusqu'à présent investigué les compétences des dyscalculiques sous l'angle de la nouvelle conception, celle-ci étant encore très récente. On peut toutefois supposer qu'elle est théoriquement valable pour expliquer le développement pathologique des compétences en arithmétique.

Au niveau des stratégies utilisées, les études réalisées jusqu'alors chez les dyscalculiques présentent les mêmes failles méthodologiques que celles qui se sont concentrées sur les enfants au développement normal. Certaines études utilisent une tâche de vérification (e.g., Geary & al., 1987), activité qui nécessite un traitement cognitif supplémentaire à la résolution. D'autres peuvent être critiquées sur leur manière de catégoriser une réponse comme « récupérée en mémoire ». Certaines se basent souvent sur les observations on-line de l'expérimentateur, en référence à la classification des réponses adoptée par Siegler et Robinson (1982) : l'enfant récupère en mémoire du moment que l'expérimentateur n'observe pas d'autre comportement que la réponse, comme du comptage verbal (comptage à haute voix, mouvement des lèvres...) ou digital. Ces observations sont ensuite pondérées avec des rapports verbaux, où l'on invite l'enfant à préciser quelle stratégie il a utilisée (e.g., Geary, 1990 ; Geary & al., 2004 ; Barrouillet & Lépine, 2005). Là encore apparaît le même problème de fiabilité des auto-évaluations, sur des processus si courts qu'ils n'atteignent sûrement pas le seuil de conscience.

Pour rappel, la nouvelle conception suppose un développement qui tend vers une automatisation des procédures de calcul. Or, une composante cognitive pouvant être en partie liée à cette automatisation est par ailleurs la même que celle qui serait déficitaire chez les dyscalculiques : la mémoire de travail. Elle intervient en effet à plusieurs étapes dans la

résolution d'une addition. Si l'on raisonne à partir de la stratégie du Min, on doit d'abord accéder au plus grand des deux opérands, ce qui nécessite de garder en mémoire deux opérands, de les manipuler, soit de les comparer en se référant à notre ligne numérique mentale et d'accéder au plus grand sur cette ligne. Ensuite, on doit incrémenter du nombre d'unité correspondant au plus petit opérande, et donc retenir, durant cette opération le second opérande. Retenir un matériel pendant qu'on le manipule est justement le rôle-clé de cette composante cognitive. Cela sollicite ses fonctions de stockage mental, de résistance à l'interférence, et même de mise à jour de l'information lorsqu'on se retrouve dans une situation de test dans laquelle on enchaîne les opérations. Les dyscalculiques ont justement de moindres compétences dans ces différentes fonctions de la MdT. Chaque étape peut être ralentie, ce qui surcharge la MdT pour effectuer l'étape suivante. En accord avec le modèle du *Time-Based Resource-Sharing* (Barrouillet & Camos, 2007), Barrouillet, Lépine et Camos (2008) suggèrent par ailleurs que le temps nécessaire pour accomplir chaque étape d'une procédure dépend d'une ressource cognitive générale - la quantité d'attention disponible - et que cette ressource module l'influence de la capacité de la MdT. Dans leur étude comparant deux groupes d'individus aux capacités de MdT différentes, les écarts comportementaux augmentaient lorsque la tâche nécessitait plus d'étapes de traitement. Dans cette perspective, les enfants dyscalculiques n'arriveraient pas à automatiser suffisamment les procédures de calcul, car chaque étape est trop coûteuse, requiert trop d'attention et leur fait faire plus d'erreurs, par exemple au moment de l'incrémementation, ou les pénalise lors de l'étape suivante.

1.2 Buts et utilité de la présente recherche

Au vu des récentes études chez l'adulte témoignant en faveur d'une résolution d'additions simples par du comptage automatisé (versus un processus de récupération mnésique), il serait incohérent de supposer l'existence d'un autre processus que le comptage chez l'enfant entre 10 et 11 ans, d'autant plus lorsqu'on sait avec certitude que les plus jeunes enfants comptent. Évoluer à partir d'une stratégie de comptage vers une stratégie de récupération pour à nouveau revenir au comptage à l'âge adulte est une position difficilement défendable dans une logique développementale. Rappelons ici que selon Ashcraft et Fierman (1982), la transition d'une stratégie de comptage à celle d'une récupération s'effectuait justement vers l'âge de 10 ans. Le premier but de cette étude va donc être de s'assurer que les enfants de 10 ans ne récupèrent pas non plus le résultat d'une addition, même très simple. Autrement dit, nous voulons montrer que cette transition vers la récupération ne s'effectue jamais. Une telle démonstration permettra par ailleurs de consolider et de défendre la nouvelle

conception de la résolution des additions. Certes, il est indéniable qu'un adulte compte plus rapidement qu'un jeune enfant, mais cette observation n'est pas forcément le reflet d'un changement de stratégie. Le postulat fondamental sous-tendu par la nouvelle conception est justement qu'un comptage automatisé peut être tout aussi rapide qu'une récupération en MLT, et c'est au niveau de cette automatisation qu'adultes et enfants se distinguent. Nous allons dès lors évaluer les compétences arithmétiques d'enfants de 10 ans dans une tâche de résolution d'additions très simples, n'excédant pas la somme de 8. Pour soutenir l'influence majeure de l'automatisation sur les temps de résolution, nous avons choisi d'investiguer les différences inter-individuelles existantes dans cette tranche d'âge, soit qu'est-ce qui amène un enfant à être plus ou moins bon en calcul à cette période du développement. La mémoire de travail étant une composante cognitive associée au processus d'automatisation, et aussi en plein développement à ce moment-là, nous avons choisi de l'inclure dans nos variables. Les études portant sur les enfants dyscalculiques ont d'ailleurs montré des capacités de mémoire de travail inférieures chez ces enfants. Dans cette étude, nous évaluons ces capacités par une tâche de mémoire de chiffres, épreuve simple et fréquemment utilisée en psychologie du développement. C'est aussi le même type de tâche utilisée par de Barrouillet et Thevenot (2013) chez les adultes. D'un point de vue méthodologique, notre expérience utilise des moyens d'investigation plus précis, comme ceux développés dans les dernières études soutenant la nouvelle conception. En effet, la tâche principale de notre expérience est une tâche de résolution d'additions dans laquelle le participant produit oralement sa réponse, contrairement à celle de l'étude d'Ashcraft et Fierman (1982) qui était une tâche de vérification d'opérations. Dans d'autres recherches comme celle de Svenson et Broquist (1975), on utilisait également la réponse orale de l'enfant, mais c'était l'expérimentateur qui appuyait sur une touche. Pour obtenir une mesure plus directe, nous avons utilisé une clé vocale pour enregistrer les réponses orales, comme Fayol et Thevenot (2012) et Barrouillet et Thevenot (2013). Cette méthode comporte néanmoins d'autres défauts, notamment le fait d'être tributaire d'effets acoustiques qui n'auraient rien à voir avec le processus de résolution d'addition en lui-même. De ce fait, dans cette étude, la nouveauté est d'utiliser en plus une tâche de lecture de chiffres : le participant dénomme des numéraux arabes qui correspondent aux différentes réponses possibles de la tâche d'addition. Ces mesures permettent d'une part de contrôler les différences interindividuelles de prononciation et d'autre part de corriger les temps d'attaque vocale pour chaque numéral oral : au niveau phonétique, les numéraux oraux ne commencent pas forcément par un phonème voisé et donc ne déclenchent pas au même moment la clé vocale (e.g. « deux » commence par la consonne voisée /d/, alors que le /k/ de « quatre » est non-voisé). En résumé, les enfants de cette étude

vont être soumis à trois tâches : une tâche de mémoire de chiffres pour évaluer leurs capacités de MdT, une tâche de résolution de petites additions n'excédant pas la somme de 8 et une tâche de lecture de chiffres servant à corriger les effets acoustiques présents dans la tâche d'additions.

Notre étude s'inscrit dans le domaine de la recherche fondamentale et a pour but de remettre en question le consensus actuel autour du développement normal de la résolution d'additions. Comprendre de manière plus précise et plus juste le développement normal en arithmétique permettra ainsi d'adapter au mieux les méthodes d'enseignement des mathématiques, de diagnostic et de rééducation des troubles du calcul afin d'optimiser leur efficacité. Nos résultats auront potentiellement des implications à la fois théoriques et pratiques.

1.3 Hypothèses et prédictions

Notre première hypothèse est qu'à 10 ans la résolution de petites additions simples non-doubles se fait par une stratégie de comptage, et non de récupération mnésique, puisque vraisemblablement nous n'en observons pas chez les adultes. Comme dans toutes les études menées jusqu'alors, nous nous attendons, pour les opérations non-doubles à une augmentation des TRs en fonction de la taille des opérandes. Cependant, si notre hypothèse est vraie, cette augmentation devrait avoir les caractéristiques suivantes : 1) suivre une fonction linéaire, 2) être la mieux prédite par des prédicteurs tels que la somme ou le minimum ajouté plutôt que par la somme au carré des opérandes et 3) présenter une pente trop importante pour être expliquée par des effets de fréquence ou d'interférence. En revanche, comme cela a été observé de manière récurrente dans les précédentes études, pour les opérations doubles, nous nous attendons à observer une absence d'effet de taille des opérandes: nous devrions voir des TRs courts et constants, qui serait le signe d'une résolution par récupération en MLT pour ces opérations.

De manière alternative, nous suggérons que le développement de la résolution d'additions s'effectue par le biais d'une automatisation des procédures de comptage. Ainsi, notre seconde hypothèse est la suivante : les différences interindividuelles s'observant à cet âge sont le reflet du degré d'automatisation des procédures de comptage, qui est tributaire des capacités de MdT. Cela signifie qu'il n'y aurait pas de changement de stratégie à proprement dit, mais simplement une optimisation de celle-ci. Si cela est vrai, les patterns de tous les enfants devraient suivre une fonction linéaire, mieux prédite par les prédicteurs tels que la somme ou le minimum ajouté. On ne devrait observer qu'une différence de pente entre les enfants : la pente devrait être plus importante chez les enfants ayant les plus faibles capacités de MdT. Et de manière générale, les enfants avec les meilleures capacités de MdT devraient être les plus rapides, soit présenter en moyenne les TRs les plus courts.

2. Méthode

2.1 Participants

Trente-sept enfants issus de 3 établissements scolaires publics genevois de 6^{ème} primaire (système romand HarmoS) ont pris part à l'expérience. Les élèves étaient âgés entre 10 ans 0 mois et 11 ans 5 mois ($M = 10$ ans 6 mois ; $SD = 4,92$ mois). L'échantillon était constitué de 20 garçons et 17 filles.

2.2 Matériel & procédure

Chaque élève a été testé individuellement lors d'une passation de 25 minutes. L'expérience est constituée de trois tâches : une tâche de résolution d'additions simples (divisée en deux sessions), une tâche de mémoire de chiffres et une tâche de lecture à voix haute de chiffres. Les différentes tâches sont passées dans l'ordre suivant pour tous les enfants: la tâche de résolution d'addition (première session), la tâche de mémoire de chiffre, la tâche de résolution d'addition (deuxième session), la tâche de lecture de chiffres.

Pour la tâche de résolution d'additions, deux listes de 48 calculs ont été créées pour les deux sessions qu'elle comporte. Ces calculs sont les 16 additions qu'il est possible de construire avec les opérandes de 1 à 4, et sont présentés au sein de 3 blocs. Au cours de la passation, l'enfant est confronté 6 fois au même calcul (2 x 3 blocs). L'ordre de présentation des calculs varie entre les deux listes. La moitié des participants débute la première session avec la première liste, l'autre moitié avec la seconde. La tâche a été conçue sur le logiciel DMDX (Forster & Forster, 2003). Chaque addition est présentée sur l'écran de l'ordinateur de manière horizontale (e.g., $3 + 2$) et est précédée d'un point de fixation (\$\$\$) durant 500 ms. La réponse orale du participant est enregistrée au moyen d'une clé vocale. Les erreurs de productions ou de déclenchement de la clé vocale sont reportées manuellement par l'expérimentateur. L'addition disparaît dès le déclenchement de la clé vocale. Les résultats récoltés correspondent aux temps de réponse (en millisecondes), soit le temps qui s'est écoulé entre la présentation de l'addition et la réponse du participant. La consigne est de résoudre l'opération le plus vite et le plus justement possible en évitant des bruits vocaux autres que la réponse. Un entraînement de 16 items précède la première session pour familiariser l'enfant à la tâche et régler si besoin la sensibilité de la clé. Après chaque bloc de calcul, une pause est proposée à l'enfant.

La tâche de mémoire de chiffres est tirée de la quatrième édition de l'Échelle d'Intelligence de Wechsler pour Enfants et Adolescents (WISC-IV) (Wechsler & Kort, 2005). Cette tâche permet de mesurer la capacité de mémoire de travail verbale sous la forme d'un

empan de chiffres. Dans cette épreuve, l'expérimentateur présente oralement à l'enfant une séquence de chiffres (e.g., 3-4-8). Dans un premier temps, l'enfant doit la restituer oralement dans le même ordre (3-4-8). Un exemple est donné dans la consigne. La longueur de la séquence augmente au fil de la tâche : le premier niveau débute avec 2 chiffres à restituer, puis on rallonge la séquence d'un chiffre supplémentaire à chaque niveau; le niveau maximum comporte 8 chiffres à retenir. Chaque niveau comporte deux séquences de même longueur. La tâche s'arrête quand l'enfant ne restitue pas correctement 2 séquences du même niveau. Dans un deuxième temps, l'enfant réalise la même tâche avec d'autres items, mais doit cette fois restituer la séquence dans l'ordre inverse (8-4-3 pour l'exemple précédent). Nous retenons 3 scores de cette tâche: un empan direct (EMCD), un empan inverse (EMCI) et la somme des deux empan.

Enfin, la tâche de lecture de chiffres consiste en une dénomination des 7 numéraux arabes correspondant aux 7 réponses possibles de la tâche de résolution, soit les sommes de 2 à 8. Les 7 items sont présentés en quatre blocs de manière aléatoire (28 items en tout) avec une pause proposée entre chaque bloc. Cette épreuve a été conçue sur le logiciel DMDX (Forster & Forster, 2003) et se présente de la manière suivante : un chiffre apparaît au centre de l'écran durant 1500 ms, suivi d'une croix de fixation. Dès l'apparition de ce signal, l'enfant doit dénommer oralement le chiffre qu'il vient de voir. La réponse orale du participant est enregistrée au moyen d'une clé vocale. Les erreurs de productions ou de déclenchement de la clé vocale sont reportées manuellement par l'expérimentateur. La croix de fixation disparaît dès le déclenchement de la clé vocale. Les résultats récoltés correspondent aux temps de réponse (mesurés en millisecondes), soit le temps qui s'est écoulé entre la présentation de la croix de fixation et la réponse du participant. La consigne est de lire dans sa tête le chiffre qui apparaît à l'écran et d'attendre l'apparition de la croix de fixation pour dénommer le chiffre le plus vite possible, en évitant d'autres bruits vocaux. Un entraînement de 7 essais est réalisé pour réajuster la sensibilité de la clé vocale et pour familiariser l'enfant à la tâche. Pour rappel, cette dernière tâche sera utilisée à des fins de correction sur les données de la tâche de résolution d'additions.

2.3 Variables

La variable dépendante est le temps de résolution des additions (TR), mesuré en millisecondes. Les deux premières variables indépendantes sont la taille de chacune des deux opérands, pouvant prendre respectivement des valeurs de 1 à 4, ce qui permet de construire 16 opérations différentes, dont 4 opérations doubles ($1+1$; $2+2$; $3+3$; $4+4$). La troisième variable indépendante est la capacité de mémoire de travail, mesurée par le score total à la tâche de mémoire de chiffres, obtenu par la somme d'EMCD et EMCI.

3. Résultats

3.1 Lecture de chiffres

Pour rappel, les résultats de la lecture de chiffres sont utilisés pour corriger les données de la tâche de résolution d'additions. Pour chaque enfant, nous avons calculé le temps moyen pour prononcer un certain chiffre, correspondant à une somme de la tâche d'additions (e.g., l'enfant X dit en moyenne « 3 » en 774 ms). Nous avons ensuite calculé le temps de production moyen de tous les chiffres pour un même enfant (e.g., l'enfant X dit n'importe quel chiffre en moyenne en 811 ms). Puis, nous avons regardé de combien dévie le temps de lecture de chaque chiffre par rapport à la moyenne globale (e.g., $811 \text{ ms} - 774 \text{ ms} = 37 \text{ ms}$). Finalement, cette différence a été ajoutée au temps de résolution de la tâche d'addition pour chaque enfant (e.g., X répond correctement à « $1+2$ » en 900 ms, donc on corrige par $900 + 37 = 937 \text{ ms}$). La même déviation est ajoutée pour un enfant à tous les calculs donnant la même somme. Précisons que la déviation est parfois négative, donc la différence est soustraite au temps de résolution.

3.2 Résolution d'additions

3.2.1 Pourcentages de réponses correctes

En observant les 16 problèmes présentés aux enfants, on constate que le taux de réponses correctes varie entre 89% pour $4+2$ et 100% pour $1+2$ et $2+1$ (Tableau I). L'erreur la plus fréquente apparaît pour l'opération $4+2$ avec une réponse erronée de 7 (+1), 5 (-1) ou 4 (-2) à la place du résultat attendu de 6. Il n'y a pas de corrélation significative entre la somme et le pourcentage de bonnes réponses, tant pour les opérations doubles que pour les non-doubles. Cela indique que ce ne sont pas forcément les calculs plus grands qui sont les moins bien réussis. Avec de tels résultats, aucune analyse de variance n'a pu être effectuée puisque deux conditions (i.e., $1+2$ et $2+1$) ont une variance quasi-nulle (soit en moyenne 100% de réponses correctes). Ces hauts scores nous conduisent ainsi à analyser en particulier les TRs pour les bonnes réponses. Qui plus est, il est assez classique d'observer dans la littérature que l'analyse des TRs et de leur distribution est la plus informative pour étudier les processus mis en jeu dans la résolution d'additions.

Tableau I

Pourcentages de réponses correctes (et écarts-types) en fonction du 1^{er} et du 2^{ème} opérande.

1 ^{er} opérande	2 ^{ème} opérande			
	1	2	3	4
1	97 (9)	100 (0)	94 (11)	96 (8)
2	100 (3)	99 (4)	93 (13)	92 (12)
3	91 (15)	92 (13)	98 (6)	97 (6)
4	96 (7)	89 (17)	94 (11)	99 (5)

3.2.2 Temps de résolution

3.2.2.1 Analyse de l'ensemble du groupe

Parmi les TRs portant sur les bonnes réponses, nous avons supprimé de nos analyses les réponses pour lesquelles nous avons reporté une erreur de déclenchement de la clé vocale durant la passation. Étant donné que le temps de prononciation moyen d'un chiffre, tous participants confondus, est de 543 ms (valeur obtenue avec les résultats de la tâche de lecture de chiffres), tous les TRs récoltés inférieurs à 600 ms ont aussi été exclus des analyses. Nous les avons en effet considérés comme des erreurs de déclenchement de la clé vocale non-détectées lors de la passation. Nous avons finalement éliminé les TRs de la tâche d'addition supérieurs à 3 écarts-types au-dessus de la moyenne. Au total, ces données supprimées correspondent à 5.9 % des données de départ. Suite à ces corrections, les données d'un enfant ont encore été retirées des analyses. En effet, par l'instauration de ces modifications, certaines opérations se sont retrouvées dépourvues de données. De ce fait, les analyses suivantes ont été effectuées sur 36 enfants au lieu de 37.

Tableau II

TRs moyens (et écarts-types) en fonction du 1^{er} et du 2^{ème} opérande. La couleur des cases sert à visualiser les TRs de différents sous-types d'opérations (cf. Discussion): les doubles (gris foncé), les non-doubles impliquant l'opérande 1 (gris clair) et les non-doubles n'impliquant pas 1 (blanc).

1 ^{er} opérande	2 ^{ème} opérande				Moyenne du 1 ^{er} opérande
	1	2	3	4	
1	921 (189)	1026 (296)	1081 (356)	1154 (408)	1046
2	1008 (281)	925 (199)	1277 (810)	1313 (408)	1131
3	1069 (289)	1210 (634)	911 (241)	1299 (596)	1122
4	1040 (321)	1315 (623)	1288 (694)	926 (225)	1142
Moyenne du 2 ^{ème} opérande	1010	1119	1139	1173	

En premier lieu, nous avons réalisé une ANOVA à mesures répétées avec les facteurs du 1^{er} (1, 2, 3, 4) et du 2^{ème} opérande (1, 2, 3, 4) sur les TRs de la tâche d'additions (Tableau II, Figure 1). Cette analyse met en évidence un effet de la taille du 1^{er} opérande, $F(3,105)=4,69$, $\eta^2 = .12$, $p < .005$, et du 2^{ème} opérande, $F(3, 105)=8,15$, $\eta^2 = .19$, $p < .001$, avec une moyenne de 1111 ms pour le 1^{er} opérande et de 1110.75 ms pour le 2^{ème}. De même, il y a aussi un effet d'interaction entre le 1^{er} et le 2^{ème} opérande, $F(9,315)=11,79$, $\eta^2 = .25$, $p < .001$. Cette interaction peut en partie être expliquée par la présence des opérandes doubles qui présentent de très faibles TRs. Il est difficile de les exclure des analyses statistiques car une opération acquiert le statut « double » à des valeurs différentes du 2^{ème} opérande en fonction du 1^{er}. Par exemple, la valeur 2 du 1^{er} opérande lorsque le 2^{ème} opérande vaut 2 donne lieu à un TR extrêmement court, ce qui n'est pas le cas quand le 2^{ème} opérande vaut 1, 3 ou 4. Ces TRs très courts sont visibles dans les cases les plus foncées du Tableau II. Toutefois, l'effet d'interaction reste visible graphiquement lorsque les opérations doubles ne sont pas prises en compte, comme on peut le voir sur la Figure 1, quand bien même une analyse statistique ne peut pas être menée sans les doubles. Les pentes liées à l'augmentation de taille du 2^{ème} opérande lorsque la taille du 1^{er} opérande augmente vont dans le sens d'un accroissement : elles sont de 64, 106, 72 et 124 ms quand le 1^{er} opérande est 1, 2, 3 et 4 respectivement (soit en moyenne 92 ms).

Les pentes liées à l'augmentation de taille du 1^{er} opérande sont de 16, 96, 60 et 72 ms quand le 2^{ème} opérande vaut 1, 2, 3 et 4 respectivement (soit en moyenne 61 ms). En d'autres termes, l'influence de la taille du 2^{ème} opérande augmente en moyenne avec la taille du 1^{er} et inversement. Donc dans tous les cas, que le 1^{er} ou le 2^{ème} opérande augmente de 1, les enfants sont ralentis de 77 ms en moyenne. On remarque par ailleurs que l'influence de la taille du 2^{ème} opérande sur les valeurs du 1^{er} est plus importante que l'influence de la taille du 1^{er} opérande sur les valeurs du 2^{ème} : la pente moyenne est plus importante dans le premier cas (92 ms contre 61 ms). On peut également observer cet effet d'interaction lorsqu'on regarde l'augmentation des TRs en fonction de la somme, pour les doubles et les non-doubles (Figure 2). Enfin nous avons observé quel type de fonction correspondait au mieux au pattern des TRs. Pour les opérations non-doubles, les fonctions de type linéaire et exponentielle s'ajustent aussi bien l'une que l'autre au pattern des TRs, avec 92% de variance expliquée pour les deux. Pour les opérations doubles, seule une faible part de variance des TRs est expliquée tant par une fonction linéaire ($R^2 = .31$) que par une fonction exponentielle ($R^2 = .32$).

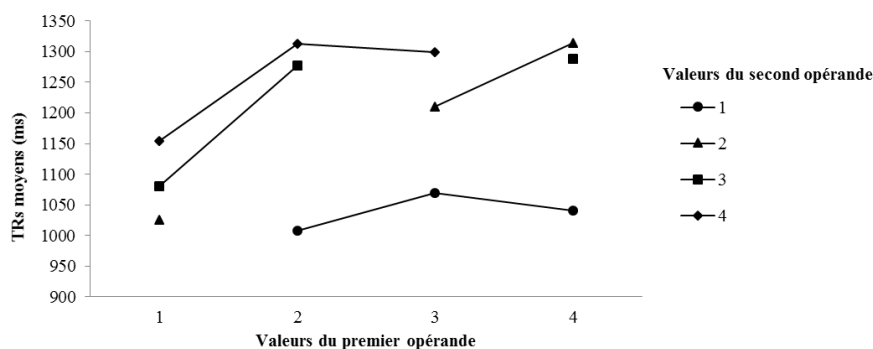


Figure 1.

TRs moyens pour les opérations non-doubles en fonction des valeurs du premier et du second opérande.

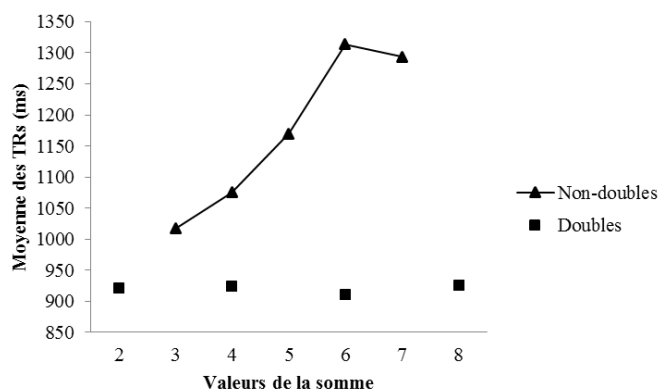


Figure 2.

TRs moyens pour les opérations doubles et non-doubles en fonction de la somme.

Dans un deuxième temps, nous avons effectué des analyses de régression au travers des corrélations entre les TRs et différents prédicteurs utilisés dans la littérature. Le but est ainsi d'observer quel attribut de l'opération, lorsqu'il augmente en magnitude, explique le mieux la variance observée sur les TRs. Nous observons cette variance en fonction de la taille de huit prédicteurs (Tableau III), représentant différents attributs structurels de nos opérations: le 1^{er} opérande, le 2^{ème} opérande, le maximum ajouté (l'opérande le plus grand), le minimum ajouté (l'opérande le plus petit), la somme des opérandes, la somme au carré des opérandes (e.g., 25 pour 2 + 3), la somme des opérandes au carré (e.g., 13 pour 2 + 3) et le produit.

Pour les opérations non-doubles, les meilleurs prédicteurs de la variation des TRs sont le produit et la somme (tous les deux $r = .87$), avec des pentes de 30 ms et 79 ms, ainsi que le minimum et la somme au carré des opérandes (tous les deux $r = .85$), avec des pentes de 135 ms et 8 ms. Viennent ensuite la somme des opérande au carré ($r = .79$), le maximum ajouté ($r = .65$) et le 2^{ème} opérande ($r = .64$), avec des pentes de 14 ms, 102 ms et 68 ms respectivement. Enfin le 1^{er} opérande n'était pas un prédicteur significatif des TRs. De plus, une analyse de régression par étapes (*stepwise analysis*) montre l'importance de la somme pour expliquer ce que font les enfants dans la résolution d'additions. La somme reste le meilleur prédicteur des TRs lorsqu'on regarde la contribution de chacun, $t(8) = 4.53$, $p < .002$. Le prédicteur suivant, qui ressort de la régression par étapes, est la somme des opérandes au carré, $t(8) = -3.38$, $p = .01$.

Pour les opérations doubles, aucun prédicteur ne ressort significatif pour expliquer la variation des TRs. Les pentes associées aux prédicteurs sont quasi-inexistantes (entre 0 et 3 ms). L'analyse de régression par étapes ne fait ressortir aucun prédicteur comme significatif.

Tableau III

Prédicteurs des TRs pour les différents problèmes avec leur coefficient de corrélation et leur moyenne de pente (ainsi que leur écart-type).

<i>Prédicteurs</i>	Additions			
	Non-doubles ^a		Doubles ^b	
	<i>r</i>	<i>Pente</i>	<i>r</i>	<i>Pente</i>
<i>1^{er} opérande</i>	.36	38 (75)	.56	3 (61)
<i>2^{ème} opérande</i>	.64*	68 (95)	.56	3 (61)
<i>Maximum</i>	.65*	102 (124)	.56	3 (61)
<i>Minimum</i>	.85***	135 (247)	.56	3 (61)
<i>Somme</i>	.87***	79 (117)	.56	1 (30)
<i>Somme²</i>	.85***	8 (12)	.63	0 (3)
<i>Somme des opérandes²</i>	.79**	14 (20)	.63	0 (6)
<i>Produit</i>	.87***	30 (49)	.63	1 (12)

* $p < .05$, ** $p < .01$, *** $p < .001$,

^a nombre d'opérations = 12, ^b nombre d'opérations = 4

3.2.2.2 Analyse selon les scores de mémoire de travail

Comme on peut le constater dans le Tableau II, les écarts-types de nos données sont relativement importants. Une seconde série d'analyses a été réalisée afin de déterminer si des performances différentes étaient masquées par la moyenne de notre échantillon total, et pouvaient s'expliquer par une autre variable sur laquelle nous avons évalué nos participants : leur score à la tâche de MdT.

Les scores dans la tâche MdT (correspondant à la somme de l'empan de mémoire de chiffre en ordre direct (EMCD) et de l'empan de mémoire de chiffre en ordre inverse (EMCI)) des 36 participants variaient entre 7 et 18 ($M = 11.86$; $SD = 2.38$). Afin de pouvoir comparer les enfants en fonction de leurs capacités de MdT, nous avons divisé notre échantillon en 2 groupes. Ainsi, les 13 meilleurs enfants ont été classés dans le groupe *Bonne MdT* ($M = 14.46$; $SD = 1.45$). Les 14 enfants avec les moins bons scores de MdT ont été classés dans le groupe *Faible MdT* ($M = 9.57$; $SD = 0.85$). Neuf enfants ayant des scores trop proches de la moyenne ont été écartés, et nos analyses ont donc été conduites sur 27 enfants.

Tableau IV

TRs moyens (et écarts-types) en fonction du 1^{er} et du 2^{ème} opérande pour les enfants des groupes Bonne MdT et Faible MdT. La couleur des cases sert à visualiser les TRs de différents sous-types d'opérations (cf. Discussion): les doubles (gris foncé), les non-doubles impliquant l'opérande 1 (gris clair) et les non-doubles n'impliquant pas 1 (blanc).

Bonne MdT					
	2 ^{ème} opérande				
1 ^{er} opérande	1	2	3	4	Moyenne du 1 ^{er} opérande
1	902 (203)	971 (232)	1022 (284)	1048 (315)	986
2	954 (226)	917 (213)	1066 (369)	1088 (503)	1007
3	987 (262)	1031 (223)	823 (221)	1159 (385)	1000
4	940 (279)	1083 (495)	1091 (300)	897 (226)	1003
Moyenne du 2 ^{ème} opérande	946	1000	1001	1048	
Faible MdT					
	2 ^{ème} opérande				
1 ^{er} opérande	1	2	3	4	Moyenne du 1 ^{er} opérande
1	960 (206)	1118 (395)	1205 (459)	1295 (510)	1144
2	1097 (343)	970 (216)	1690 (1149)	1657 (700)	1353
3	1151 (342)	1501 (933)	1010 (291)	1590 (796)	1313
4	1131 (346)	1649 (734)	1603 (995)	962 (277)	1336
Moyenne du 2 ^{ème} opérande	1085	1310	1377	1376	

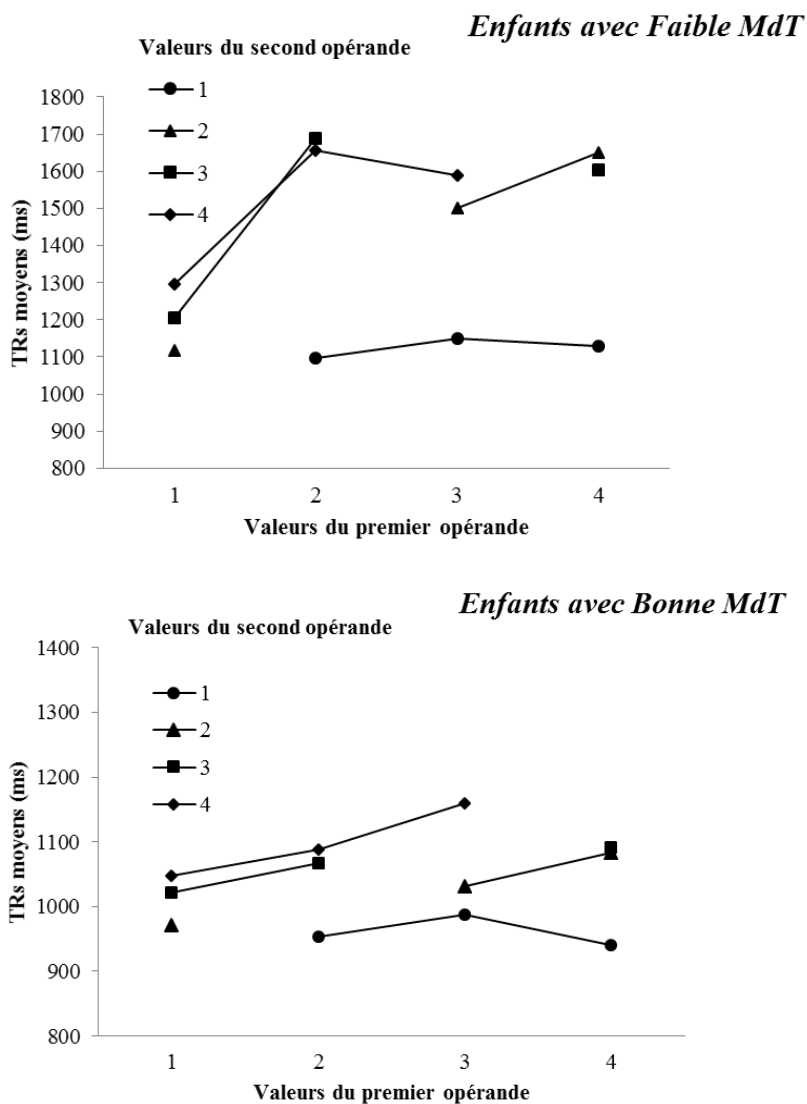


Figure 3.

TRs moyens pour les opérations non-doubles en fonction des valeurs du premier et du second opérande chez les enfants du groupe *Faible MdT* versus *Bonne MdT*. Deux échelles différentes ont volontairement été choisies afin de mettre en avant les similarités des patterns des TRs pour les deux groupes d'enfants.

Dans un deuxième temps, nous avons réalisé une ANOVA à mesures répétées avec les facteurs du 1^{er} (1, 2, 3, 4) et du 2^{ème} opérande (1, 2, 3, 4) ainsi qu'avec les 2 groupes de performances en mémoire de travail (*Bonne MdT*, *Faible MdT*) sur les TRs (Tableau IV). Nous observons un effet principal du groupe de MdT, $F(1, 25)=3,62$, $\eta^2 = 0.13$, $p = .07$: les enfants ayant les moins bonnes capacités de MdT ont des TRs plus longs (en moyenne 1287 ms, versus 999 ms pour le groupe *Bonne MdT*). De plus, nous observons un effet d'interaction entre le 1^{er} opérande et le groupe de MdT, $F(3, 75)=3.32$, $\eta^2 = .12$, $p = .02$, de même qu'un effet

d'interaction entre le 2^{ème} opérande et le groupe de MdT, $F(3, 75)=2.96$, $\eta^2 = .11$, $p= .04$. En d'autres termes, cela signifie que l'incrément de la 1^{ère} opérande a une plus grande influence sur l'augmentation des TRs chez les enfants avec de moindres capacités de MdT, tout comme l'incrément de la 2^{ème} opérande : on remarque graphiquement (Figure 3) que chaque pente est plus inclinée dans le graphique de gauche que la pente correspondante dans le graphique de droite. L'effet de taille pour chaque opérande est plus important chez les *Faible MdT* pour les opérations non-doubles. Finalement, il y a une interaction triple entre le 1^{er} opérande, le 2^{ème} opérande et le groupe de MdT, $F(9, 225)=2.83$, $\eta^2 = .10$, $p= .004$. Cela signifie que plus le 1^{er} opérande augmente, plus l'influence du 2^{ème} opérande sur les TRs est importante, et cela est d'autant plus le cas pour les enfants avec de moindres capacités de MdT, même lorsque nous ne regardons que les opérandes non-doubles : l'inclinaison de toutes les pentes est de manière générale plus forte dans le graphique de gauche (Figure 3). En termes de valeurs et sans prendre en compte les doubles, les pentes liées à l'augmentation de la taille du 2^{ème} opérande lorsque le 1^{er} opérande augmente sont en moyenne de 165 ms chez les *Faible MdT*, alors qu'elles ne sont que de 55 ms chez les *Bonne MdT*. Les pentes liées à l'augmentation de la taille du 1^{er} opérande quand le 2^{ème} augmente sont en moyenne de 113 ms chez les *Faible MdT* et de 27 ms chez les *Bonne MdT*. Donc, en moyenne, lorsqu'un des deux opérandes augmente de 1, les enfants du groupe *Faible MdT* sont 139 ms plus lents, et les enfants du groupe *Bonne MdT* 41 ms plus lents. La différence dans l'échelle des unités utilisées, permet de mieux visualiser la similarité des patterns des TRs entre les deux groupes.

Les opérations doubles donnent lieu à des TRs courts dans les deux groupes (Tableau IV, cases les plus foncées), qui comme précédemment expliquent en partie les effets d'interaction. Si l'on ne peut pas le faire ressortir statistiquement, on remarque néanmoins graphiquement que les effets d'interactions existent toujours lorsqu'on regarde l'augmentation des TRs en fonction de la somme, pour les doubles et les non-doubles (Figure 4).

Comme pour la première série d'analyse, nous avons aussi regardé quel type de fonction s'ajustait au mieux au pattern des TRs dans chacun des groupes. Pour le groupe *Bonne MdT*, les fonctions linéaire et exponentielle expliquent de manière similaire une haute part de variance des TRs pour les opérations non-doubles (respectivement 97% et 98%), alors que ni l'une ni l'autre ne reflète bien le pattern des TRs pour les opérations doubles ($R^2 = .06$ pour les deux). Pour le groupe *Faible MdT*, les deux fonctions s'ajustent bien au pattern des TRs pour les opérations non-doubles (89% de variance expliquée pour la fonction linéaire, 90% pour la fonction exponentielle), tandis que ni l'une ni l'autre n'explique vraiment celui des opérations doubles ($R^2 = .03$ pour les deux).

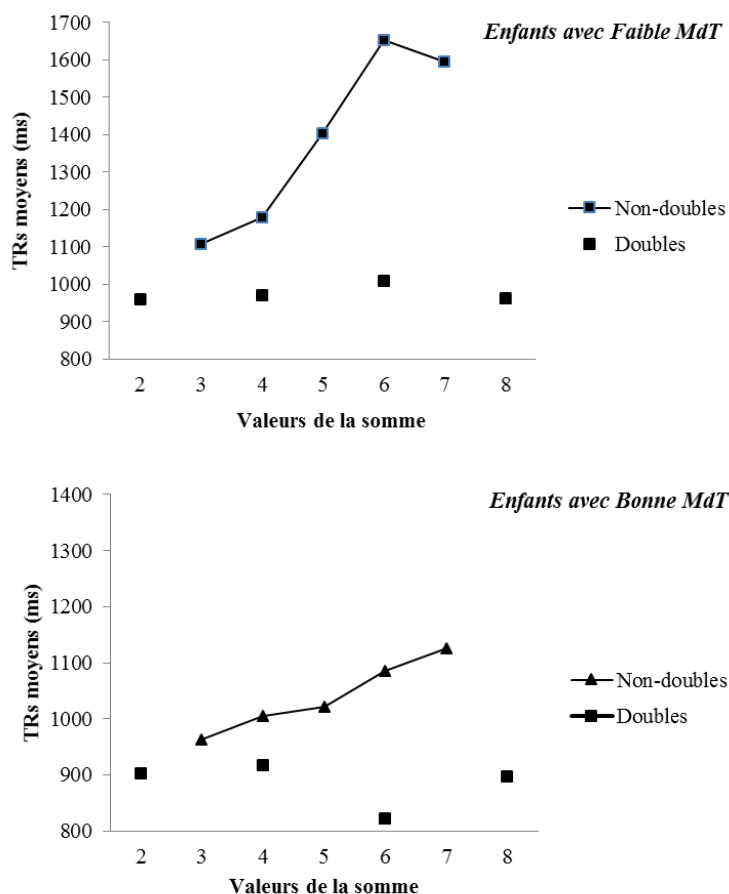


Figure 4.

TRs moyens pour les opérations doubles et non-doubles en fonction de la somme chez les enfants du groupe Bonne MdT versus Faible MdT. Deux échelles différentes ont volontairement été choisies afin de mettre en avant les similarités des patterns des TRs pour les deux groupes d'enfants

Nous avons ensuite procédé à des analyses de régression (Tableau V), dont les résultats ne sont pas complètement identiques par rapport à ceux découlant des analyses portant sur tous les participants. L'analyse de régression par étapes (*stepwise analysis*) ne fait pas ressortir les mêmes prédicteurs que précédemment, et on constate aussi une différence intergroupe au niveau des prédicteurs ayant la plus grande contribution explicative de la variabilité des TRs. Pour les opérations non-doubles, on observe chez les enfants *Bonne MdT* que les deux prédicteurs les plus explicatifs sont le produit $t(9) = 4.98$, $p < .001$ et le second opérande $t(9) = 3.65$, $p = .005$. En revanche, le prédicteur le plus important chez les enfants *Faible MdT* est le minimum, $t(9) = 3.77$, $p = .004$. Néanmoins, les corrélations observées, reportées dans le Tableau V, présentent plus de similarités. Les quatre prédicteurs ayant la plus forte corrélation sont les même dans les deux groupes : chez les enfants *Bonne MdT*, c'est le produit ($r = .87$), le minimum ($r = .85$), la somme au carré ($r = .85$) et la somme ($r = .84$), avec des pentes

respectivement de 16 ms, 71 ms, 4 ms et 41 ms ; chez les enfants *Faible MdT*, c'est le minimum ($r = .84$), le produit ($r = .82$), la somme ($r = .80$) et la somme au carré ($r = .78$), avec des pentes respectivement de 264 ms, 56 ms, 145 ms et 14 ms. Ce sont par ailleurs les quatre mêmes prédicteurs qui ressortent des analyses effectuées sur l'échantillon total, avec des corrélations similaires ($.87 \leq r \leq .79$). Pour les enfants du groupe *Bonne MdT*, les TRs corrélaient de manière importante avec le 2^{ème} opérande ($r = .80$) et la somme des opérandes au carré ($r = .78$), ainsi qu'avec le maximum ajouté dans une moindre mesure ($r = .60$), avec des pentes respectivement de 44 ms, 7 ms et 51 ms. Pour les enfants du groupe *Faible MdT*, les TRs présentent une corrélation importante avec la somme des opérandes au carré ($r = .71$), ainsi qu'avec le 2^{ème} opérande dans une moindre mesure ($r = .59$), les pentes étant respectivement de 25 ms, et 124 ms. Le 1^{er} opérande n'est pas significatif dans les deux groupes, et le maximum ajouté ne l'est pas non plus pour les enfants du groupe *Faibles MdT*.

Pour les opérations doubles, on observe le même pattern que précédemment et ce dans les deux groupes : aucun prédicteur n'est significatif pour expliquer la variation des TRs, et les pentes associées sont faibles (entre -3 et 8 ms) ; l'analyse de régression par étapes ne fait ressortir aucun prédicteur significatif.

Tableau V.

Coefficients de corrélation et pentes (et écarts-types) associés aux prédicteurs des TRs pour les différents types d'opérations pour les enfants des groupes Bonne MdT et Faible MdT.

Prédicteurs	Additions			
	Non-doubles ^a		Doubles ^b	
	<i>r</i>	<i>Pente</i>	<i>r</i>	<i>Pente</i>
Bonne MdT				
<i>1^{er} opérande</i>	.17	10 (64)	.24	8 (25)
<i>2^{ème} opérande</i>	.80**	44 (63)	.24	8 (25)
<i>Maximum</i>	.60*	51 (112)	.24	8 (25)
<i>Minimum</i>	.85***	71 (134)	.24	8 (25)
<i>Somme</i>	.84***	41 (77)	.24	4 (13)
<i>Somme²</i>	.85***	4 (8)	.31	0 (1)
<i>Somme des opérandes²</i>	.78**	7 (14)	.31	1 (3)
<i>Produit</i>	.87***	16 (30)	.31	2 (5)
Faible MdT				
<i>1^{er} opérande</i>	.33	70 (92)	-.19	-3 (86)
<i>2^{ème} opérande</i>	.59*	124 (118)	-.19	-3 (86)
<i>Maximum</i>	.55	172 (124)	-.19	-3 (86)
<i>Minimum</i>	.84***	264 (336)	-.19	-3 (86)
<i>Somme</i>	.80**	145 (150)	-.19	-2 (43)
<i>Somme²</i>	.78**	14 (15)	-.31	0 (4)
<i>Somme des opérandes²</i>	.71**	25 (24)	-.31	-1 (8)
<i>Produit</i>	.82**	56 (64)	-.31	-1 (17)

* $p < .05$, ** $p < .01$, *** $p < .001$

^a nombre d'opérations = 12, ^b nombre d'opérations = 4

4. Discussion

Pour rappel, le but de ce travail était de réinvestiguer avec une méthodologie plus rigoureuse les stratégies utilisées par des enfants de 10-11 ans dans la résolution de petites additions simples impliquant des opérands de 1 à 4. Au vu des récentes études réfutant l'idée d'un passage d'une stratégie de comptage à une stratégie de récupération de mémoire, qui ne semblent pas même être présente chez des adultes experts, nous nous attendions à observer toujours et encore des stratégies de comptage chez les enfants de 10-11 ans, stratégies qui sont en voie d'automatisation. Dans cette étude, le degré d'automatisation est représenté par les scores en MdT, l'une des composantes cognitives impliquées dans un tel processus.

La première hypothèse était la suivante : l'augmentation des TRs observée dans notre échantillon pour la tâche de résolution d'additions devrait être mieux expliquée par le recours à des procédures de calcul plutôt que par de la récupération en mémoire. Nous devrions ainsi retrouver un pattern de TRs présentant les caractéristiques suivantes : une pente importante, suivant une fonction d'aspect linéaire qui est mieux prédite par des attributs comme la somme ou le minimum ajouté. Celle-ci a été testée grâce à l'analyse sur l'ensemble de l'échantillon.

La seconde hypothèse, était que les différences interindividuelles s'observant à cet âge sont le reflet du degré d'automatisation des procédures de comptage, tributaire notamment des capacités de MdT. Ce degré d'automatisation devrait se remarquer au niveau de l'accélération TRs, sans toutefois changer le pattern général de leur distribution en fonction de la taille des opérands. Des différences au niveau des compétences en MdT ne devraient modifier que l'échelle sur laquelle on peut représenter les TRs : plus les compétences de MdT sont bonnes, plus les TRs devraient être globalement faibles. Cette prédiction a été vérifiée en analysant les TRs en fonction des scores de MdT.

4.1 Résolution d'additions à l'âge de 10 ans : comptage ou récupération ?

Concernant l'analyse sur l'ensemble du groupe, nous observons dans un premier temps des TRs se situant en moyenne entre 1008 ms (e.g., 1+2) et 1315 ms (e.g., 2+4) pour les opérations non-doubles. Ces résultats sont difficilement comparables avec les précédentes études réalisées chez les enfants de 10 ans vu qu'il s'agit ici d'une tâche de production. Néanmoins, une récente étude (Thevenot, Barrouillet, Castel & Uittenhove, sous presse) utilisant la même épreuve chez des enfants entre 9 et 11 ans a mis en évidence des TRs similaires pour les enfants les plus rapides de leur échantillon. Toutefois, comme cela a été énoncé dans les critiques en introduction, un TR d'environ 1 seconde ne peut à lui seul nous

renseigner sur le processus de résolution sous-jacent, d'autant plus quand rien ne prouve que récupérer est forcément plus rapide que compter, si le comptage est bien automatisé. Le pattern suivi par les TRs est ainsi beaucoup plus informatif que les valeurs des TRs en elles-mêmes.

Nous avons effectué dans un premier temps une analyse de variance (ANOVA), qui a permis de faire ressortir les effets suivants sur les TRs: deux effets principaux de la taille du 1^{er} et du 2^{ème} opérande ainsi qu'un effet d'interaction entre la taille du 1^{er} et du 2^{ème} opérande. Ce dernier effet n'était pas seulement dû à la présence des opérations doubles, comme l'illustre la Figure 2, où l'on voit clairement une augmentation des TRs en fonction de la somme seulement pour les non-doubles. Autrement dit, les TRs augmentent avec la taille des opérandes, et plus le 1^{er} opérande est grand, plus la taille du 2^{ème} influe sur ces TRs. Ces résultats reflètent le traditionnel effet de taille, l'observation la plus consistante dans la littérature.

Les pentes liées à l'augmentation de la taille du 2^{ème} opérande étant en moyenne de 92 ms et celles liées à l'augmentation de la taille du 1^{er} opérande de 61 ms, cela signifie qu'il y a une augmentation des TRs de 77 ms en moyenne lorsqu'on incrémente l'un des deux opérandes de 1. En l'occurrence, une pente de 77 ms n'est à l'heure actuelle pas explicable par les défenseurs d'un modèle de récupération en mémoire. Comme expliqué en introduction, la présence d'un tel effet plaiderait à première vue bien plus en faveur d'une résolution par comptage : plus l'opérande est grand, plus l'on doit incrémenter sur notre ligne numérique mentale et plus cela prend du temps. Cet effet de taille, a néanmoins été expliqué par les défenseurs de la récupération en mémoire comme découlant d'autres effets imputables à un réseau mnésique, tels que les effets d'interférence et de fréquence. Or dans le cas présent, aucun de ces effets ne peut justifier nos résultats. Pour rappel, l'effet d'interférence serait dû au fait que plus la somme est grande, plus le nombre d'opérations permettant d'y aboutir est élevé, ce qui provoque une compétition entre ces opérations. Cet effet ne peut néanmoins pas tenir dans notre cas, vu que nous nous intéressons uniquement aux petites additions réalisables avec 2 opérandes variant de 1 à 4. Avec de tels calculs, le nombre d'opérations aboutissant à une même somme varie entre 3 et 9, en prenant en compte toutes les opérations possibles, y compris celles impliquant l'opérande 0 (cf. Annexe I), ce qui est une faible modulation. L'effet de fréquence, viendrait quant à lui du fait que les petites opérations seraient plus souvent rencontrées et donc mieux mémorisées en MLT par rapport aux plus grandes. Là encore, cet argument tient difficilement lorsqu'on se concentre sur les opérations impliquant des opérandes de 1 à 4 : 3+2 n'est a priori pas plus fréquent que 4+2 et pourtant, les TRs moyens de ces deux opérations diffèrent ici de plus de 100 ms (cf. Tableau 2). Comme abordé en introduction, cet effet de fréquence a par ailleurs certainement été surestimé : une étude en linguistique a montré par

exemple qu'il n'impactait les temps de réponses que de 15 ms, et ce pour des items présentant une différence de fréquence énorme (Ferrand & al., 2011, cité par Barrouillet & Thevenot, 2013). Ainsi, même si 3+2 est tout de même un peu plus souvent rencontré par les enfants que 4+2, la différence de fréquence ne sera jamais aussi importante : les 100 ms de différence ne peuvent dès lors pas s'expliquer de cette manière.

Un autre élément utilisé jusqu'à présent dans les précédentes études pour différencier les deux stratégies utilisées était la forme de la pente des TRs. De façon très simplifiée, on considère qu'un pattern suivant une fonction linéaire est signe de comptage alors qu'un pattern suivant une fonction exponentielle reflète un processus de recherche dans un réseau de faits arithmétiques. Dans notre cas, nous avons observé que les fonctions linéaire et exponentielle expliquaient de façon tout aussi importante et similaire le pattern de nos TRs pour les opérations non-doubles ($r = .92$). À première vue, ce résultat semble donc peu instructif. Pourtant, il s'explique tout à fait bien si l'on adopte une vision plus nuancée du lien entre le processus à l'œuvre et son effet sur la distribution des TRs. En fait, tant le modèle de récupération que le modèle de comptage peuvent expliquer pourquoi nous obtiendrions l'une ou l'autre de ces fonctions. Dans le cas d'un modèle de récupération mnésique comme celui envisagé par Ashcraft et Battaglia (1978), on s'attend à observer un pattern d'aspect exponentiel, celui-ci reflétant une diffusion de l'activation au sein d'une table d'additions : la recherche dans cette table progresserait le long des lignes et des colonnes pour aboutir à la bonne intersection, mais serait ralentie plus l'on va loin, par l'apparition d'effets de fréquence et d'interférences entre les différents composants de l'opération, ainsi que par la configuration en expansion de la table. Cependant Groen et Parkman (1972), qui défendent aussi l'idée d'un développement tendant vers la récupération, expliquent pourquoi on peut avoir un effet de taille d'aspect linéaire : il correspond au recours sporadique à une procédure de comptage, dans les quelques cas où la récupération échoue. Dans le cas d'un modèle de comptage qui suppose que cette procédure est utilisée tout le temps, on explique facilement la présence d'un effet de taille linéaire : il correspond à l'incréméntation de l'un ou l'autre des opérands, induisant une augmentation proportionnelle des TRs. Ce pattern linéaire a été observé typiquement chez les plus jeunes enfants, et plus récemment chez l'adulte (Barrouillet & Thevenot, 2013). Jusqu'à présent, on a ainsi supposé qu'un effet de taille autre que d'aspect linéaire était forcément le reflet d'un mécanisme autre que du comptage. Toutefois, une fonction exponentielle pourrait aussi apparaître lorsqu'une procédure de comptage est utilisée, comme l'ont suggéré Thevenot et al., (sous presse). En effet, cela pourrait être lié à la fatigabilité du système cognitif des enfants, qui les ralentirait à chaque étape supplémentaire d'une procédure algorithmique. Cette

possibilité est d'ailleurs tout à fait défendable au vu de l'effet d'interaction entre la taille du 1^{er} et du 2^{ème} opérande. Ce résultat indique non seulement que la taille de chaque opérande influe sur les TRs, mais aussi que la combinaison de deux opérandes de différentes magnitudes joue un rôle. En observant la Figure 1, on constate la chose suivante : plus le 1^{er} opérande augmente, plus la taille du 2^{ème} opérande accroît les TRs. Si l'on reprend les étapes de la procédure de comptage, l'enfant doit accéder au 1^{er} opérande sur sa ligne numérique mentale, puis incrémenter du nombre de pas correspondant au 2^{ème} opérande. Ainsi, s'il a déjà été coûteux pour lui d'accéder au 1^{er} opérande, et que cela l'est d'autant plus qu'il est de grande taille, on peut ainsi comprendre qu'il lui reste moins de ressources pour incrémenter pour le 2^{ème} opérande, et ce d'autant plus s'il faut incrémenter d'un nombre de pas plus important. En d'autres termes, chaque étape de la procédure est ralentie par la taille respective de chaque opérande et de ce fait, la transition entre les étapes est plus difficile. Cet effet d'interaction pourrait ainsi résulter de la difficulté à gérer des nombres de plus en plus grands. Ainsi, cette conception alternative vient contester la vision traditionnelle : une fonction exponentielle n'est pas assurément la marque d'une stratégie de récupération en mémoire (Widaman & al., 1989 ; Ashcraft & Battaglia, 1978). Nos résultats ne nous permettent pas d'avancer que les enfants entre 10 et 11 ans utilisent une stratégie de récupération ou au contraire une procédure de comptage, du moins pas sur la base de la nature de la fonction qui caractérise le pattern des TRs. En effet, si chaque modèle peut justifier qu'on observe une fonction linéaire ou exponentielle, alors cela ne peut plus être un critère pour différencier les processus sous-jacents.

Enfin, une analyse de régression a été conduite pour préciser quel(s) attribut(s) de nos opérations prédisait le mieux le pattern des TRs des non-doubles. Nous avons repris les huit différents attributs testés dans la littérature. Trois d'entre eux seraient le reflet d'une stratégie de récupération dans un réseau de faits arithmétiques : la somme au carré des opérandes, la somme des opérandes au carré et le produit (Widaman & al., 1989). Les autres seraient liés à un modèle de comptage. Dans sa forme la plus mature, deux prédicteurs ressortiraient principalement : le minimum ajouté chez l'enfant ou chez l'adulte (Groen & Parkman, 1972) et la somme des opérandes chez l'adulte (Barrouillet & Thevenot, 2013). Tous ces prédicteurs sont étroitement en lien avec le type de fonction s'ajustant au mieux à nos observations : un attribut mis à un exposant autre que 1 représente mathématiquement une fonction exponentielle, qui jusqu'à présent, était la marque d'une récupération en mémoire. Rappelons que la notion de carré vient du fait que selon Ashcraft et Battaglia (1978), la table de faits additifs est de forme symétrique et carrée, mais en expansion vers les sommes plus importantes, d'où la non-linéarité de la fonction résultante. En ce qui concerne le produit, dont nous n'avons pas encore parlé,

Widaman et al. (1989) ont proposé qu'il puisse aussi être un prédicteur dans la résolution d'une addition simple. On peut concevoir que ces TRs correspondent à l'activation d'une zone (une aire) du réseau mnésique qui doit être parcourue pour arriver au nœud correct, plus qu'à la distance elle-même. Dans la présente étude, tous les attributs ressortent significativement, sauf le 1^{er} opérande. Les quatre prédicteurs présentant la corrélation significativement la plus élevée sont le produit ($r = .87$), la somme ($r = .87$), le minimum ajouté ($r = .85$) et la somme au carré des opérandes ($r = .85$). Cela est à nouveau peu informatif puisque nous obtenons autant de prédicteurs en faveur d'un modèle de comptage qu'en faveur d'un modèle de récupération. Qui plus est, le produit pourrait aussi très bien être un prédicteur dans un modèle de comptage : il serait le reflet de l'interaction entre le 1^{er} et le 2^{ème} opérande, résultat que nous avons justement obtenu. Un autre aspect qui remet en doute la pertinence d'utiliser ces prédicteurs, déjà évoqué dans la littérature (Barrouillet & Thevenot, 2013 ; Thevenot & al, sous presse) est leur importante colinéarité : les coefficients de corrélations sont non seulement hauts mais aussi très proches. Et le fait que presque tous soient significatifs est aussi intrigant. Il faut donc les interpréter avec prudence. Comme Ashcraft et Stazyk (1981) par exemple, nous avons conduit une analyse de régression par étapes pour préciser quel prédicteur apporte la plus grande part explicative en tenant compte de celle des autres attributs. Celle-ci ne s'est pas avérée plus utile, car elle a fait ressortir la somme, puis la somme des opérandes au carré, soit à nouveau des prédicteurs sous-tendant des modèles opposés. Ces résultats sont toutefois parfaitement cohérents avec ce que nous obtenons concernant la nature des fonctions prédisant au mieux le pattern des TRs. On peut là encore questionner le raisonnement très tranché de considérer que tel prédicteur est le marqueur de tel modèle uniquement. Comme pour l'analyse de la forme de la pente, l'analyse des prédicteurs ne nous permet pas de nous placer en faveur de l'un ou l'autre des modèles. S'ils sont hautement colinéaires et que l'un d'entre eux peut être expliqué par les deux modèles, alors leur informativité peut être sérieusement remise en question.

Pour donner une première conclusion, ces résultats ne nous permettent pas d'apporter une réponse claire à notre première hypothèse, à savoir que les enfants de 10-11 ans recourent à des procédures de calcul pour résoudre de petites additions non-doubles, et non à une stratégie de récupération en mémoire. La seule chose que nous pouvons affirmer avec plus de certitude est que les arguments traditionnellement avancés pour de la récupération en mémoire ne semblent pas tenir ou du moins ne sont actuellement pas suffisants. Pour corroborer notre hypothèse, nous nous attendions à observer une fonction linéaire et non exponentielle. Nos résultats montrent que les deux fonctions peuvent aussi bien s'ajuster à la distribution de nos TRs. Cependant, cet indicateur est en fait peu informatif, puisque chacun des deux modèles

peut justifier de manière plausible l'obtention de l'une ou l'autre des fonctions. Deuxièmement, nous nous attendions à ce que des prédictors tels que la somme ou le minimum ajouté corrèlent mieux avec nos TRs, plutôt que la somme au carré des opérands. Nos résultats font ressortir autant de prédictors en faveur de l'un ou l'autre des modèles. Par ailleurs, ils semblent fortement colinéaires et certains d'entre eux, comme le produit, peuvent être expliqués par les deux modèles. Leur utilisation peut ainsi être remise en question. Enfin, nous nous attendions à obtenir une pente trop importante pour être expliquée par des effets de fréquence ou d'interférence, effets typiques des réseaux mnésiques. Au vu d'une pente moyenne de 77 ms, ces effets ne peuvent véritablement pas s'exprimer si fortement sur de si petits opérands.

On ne peut néanmoins pas complètement exclure que les enfants de 10-11 ans aient recours à une stratégie de récupération en mémoire pour résoudre de petites additions. En effet, les TRs associés aux opérations doubles parlent clairement en faveur du statut spécial de ces opérations. Trois éléments les différencient clairement des autres TRs de cette étude : leurs valeurs qui sont les plus faibles de tout l'échantillon, la constance de ces valeurs et surtout, l'absence d'effet de taille. On observe en effet que ces 4 opérations (i.e., 1+1, 2+2, 3+3 et 4+4) sont résolues en moyenne en 921 ms, contre 1173 ms pour les opérations non-doubles, soit un écart de plus de 250 ms. Par ailleurs, ces TRs sont aussi très constants, avec un écart-type de 7 ms, versus 123 ms pour les non-doubles si l'on considère seulement les moyennes pour chaque opération (cf. Annexe II). Cette constance va de pair avec l'absence d'effet de taille : aucun des huit prédictors ne s'est révélé significatif dans l'analyse de régression simple et par étapes concernant cette catégorie d'opérations. Les pentes sont aussi extrêmement faibles. De même, aucune des deux fonctions envisagées (linéaire et exponentielle) n'expliquait réellement la faible variance de ces TRs. Cela indique donc que la taille de l'opération n'impacte pas le comportement des enfants sur ce genre de calculs, ce qui plaide en faveur du fait que les petites additions doubles sont récupérées en mémoire, comme nombre d'études le suggèrent actuellement. Notons encore que le fait de n'obtenir aucun prédictor pour les doubles est un argument supplémentaire pour remettre en question leur utilisation en tant que marqueurs d'un mécanisme de résolution par récupération, comme celui communément admis jusqu'à présent dans la résolution des additions non-doubles.

Par ailleurs, il est ici important de rappeler que des stratégies autres que la récupération en mémoire et le comptage ont été décrites dans la littérature, notamment celles impliquant le recours à des règles arithmétiques. Baroody (1983) avait évoqué ce genre de stratégies pour les additions du type $N+0$ ou $N+1$. Dans la présente étude, ces opérations de type $N+1$ et $1+N$ (i.e., $1+2$, $1+3$, $1+4$, $2+1$, $3+1$, $4+1$) semblent également avoir un statut particulier. Elles

présentent des TRs plus élevés que les doubles mais plus courts que les autres non-doubles, avec une moyenne de 1063 ms, soit près de 200 ms d'écart par rapport aux autres non-doubles (Annexe II). Lorsqu'on considère la taille des pentes, on remarque en particulier que les opérations de type $N+1$ induisent une pente de 16 ms, alors que lorsque le 2^{ème} opérande a une autre valeur que 1, elles sont entre 60 et 96 ms. On voit aussi des TRs encore plus faibles par rapport à toutes les autres opérations non-doubles dans l'Annexe II. Ainsi, les opérations de ce type, en particulier celles de format $N+1$, semblent être résolues par un mécanisme plus automatisé qu'un algorithme de comptage, tel que la récupération d'une règle qui stipulerait que la réponse correspond au nombre qui suit directement N sur la ligne numérique (Baroody, 1983). Nous avons aussi relevé précédemment l'importante variabilité des TRs pour les opérations non-doubles en comparaison avec les doubles. Si l'on considère maintenant les TRs sous l'angle de trois catégories d'opérations (doubles, $N+1$ et $1+N$, non-doubles n'impliquant pas l'opérande 1), comme cela est visualisé dans l'Annexe II, on obtient des TRs beaucoup plus homogènes avec cette classification : on passe d'un écart-type de 123 ms pour toutes les opérations non-doubles à un écart-type de 52 ms pour les non-doubles impliquant 1 et 39 ms pour les non-doubles n'impliquant pas 1. Certes, il ne s'agit que d'analyses basées sur des moyennes et des écarts-types, mais ce constat est tout de même intéressant puisqu'il ne prend pas forcément en compte la taille des opérandes ou la somme mais bien le format des opérations.

Pour conclure sur les stratégies de résolution d'additions non-doubles à l'âge de 10 ans, nous pouvons mettre en évidence que malgré des TRs relativement courts pour ces opérations, l'effet de taille est trop important pour pouvoir être expliqué par une stratégie de récupération en mémoire, et qu'aucun indicateur statistique traditionnellement utilisé pour justifier un tel mécanisme (type de prédicteur, type de fonction) n'a pu être mis en évidence. Il n'y a donc pas d'argument allant à l'encontre d'une stratégie de comptage. De plus, nos résultats mettent en évidence le fait que ces petites additions impliquant des opérandes de 1 à 4 peuvent encore se diviser en trois sous-catégories qui semblent impliquer des mécanismes particuliers, tels que la récupération en mémoire pour les opérations doubles et la récupération de règles algorithmiques pour les non-doubles impliquant l'opérande 1.

4.2 Quid d'une évolution par comptage automatisé ? L'influence de la MdT

Concernant l'analyse selon les scores obtenus lors de la tâche de mémoire de chiffres, l'analyse de variance (ANOVA) a dégagé les effets suivants sur les TRs: un effet principal du

groupe de MdT, deux effets d'interaction double entre le groupe et la taille des deux opérandes et un effet d'interaction triple entre le groupe, la taille du 1^{er} opérande et la taille du 2^{ème} opérande, que la présence des opérations doubles n'explique qu'en partie (Figure 4).

L'effet principal montre que les enfants avec une bonne MdT ont des TRs de près de 300 ms plus courts que les enfants avec de moindres compétences en MdT. Cet effet du groupe corrobore les différents résultats de la littérature ayant montré l'influence de la MdT dans la résolution d'additions. Il s'agit donc bien d'une composante qui permet d'expliquer une part des différences interindividuelles chez des enfants de 10 ans dans ce domaine. Malgré tout, il ne nous renseigne absolument pas à lui seul sur le mécanisme sous-jacent à la résolution de l'opération. Les défenseurs de la récupération en mémoire soutiennent le fait que de bonnes capacités de MdT sont indispensables pour qu'un réseau de faits arithmétiques puisse être créé. Pour les partisans de la nouvelle conception, cette bonne MdT permet non pas le passage des informations en mémoire à long terme sémantique, mais en mémoire procédurale : l'individu utilise toujours une même stratégie, mais de manière plus efficiente, plus automatisée. Notre but consiste à montrer que les deux groupes utilisent tous la même stratégie, et que les 300 ms supplémentaires nécessaires aux enfants du groupe *Faible MdT* ne viennent pas du fait qu'ils comptent au lieu de récupérer, la première technique étant, pour l'ancienne conception, plus lente que l'autre. Thevenot et al. (sous presse), qui utilisent un paradigme et un échantillon comparables à ceux de cette recherche, ont essayé de montrer la même chose, sans prendre en compte les compétences de MdT. Cette équipe a testé l'hypothèse que les enfants les plus lents de leur échantillon recouraient à deux sortes de stratégies, d'où leurs TRs importants. Si tel est le cas, alors on devrait observer une distribution des TRs bimodale. Leur test de multimodalité n'a cependant trouvé aucun résultat significatif : rien ne prouve que deux stratégies soient utilisées. Dans notre cas, nous allons montrer qu'on retrouve exactement les mêmes résultats tant dans les deux groupes de MdT, que par rapport à l'ensemble des enfants. Les résultats du groupe *Bonne MdT* vont permettre de montrer en quoi la stratégie de récupération est d'autant plus improbable, tandis que les résultats du groupe *Faible MdT* ajouteront du crédit à la conception d'un développement qui tend vers l'automatisation du comptage.

Les effets d'interaction double reflètent l'effet de taille retrouvé dans la littérature. Les TRs augmentent avec la taille soit du 1^{er}, soit du 2^{ème} opérande et ce d'autant plus dans le groupe *Faible MdT*. Néanmoins, il reste clairement présent dans le groupe *Bonne MdT*, puisque la pente associée est en moyenne de 41 ms. Autrement dit, les enfants avec les meilleures capacités de MdT sont en moyenne plus lents de 41 ms lorsqu'on incrémente l'un des deux opérandes de 1. En l'occurrence, une pente de 41 ms n'est à l'heure actuelle toujours pas explicable par les

défenseurs d'un modèle de récupération en mémoire : ni l'effet d'interférence ni l'effet de fréquence ne peut justifier une pente de cette ampleur. L'effet d'interférence ne peut pas s'appliquer aux opérations testées et l'effet de fréquence n'engendrerait probablement qu'une différence de 15 ms pour des cas extrêmes. On remarque que cette pente semble s'amenuiser en fonction des capacités de MdT. Dans notre étude chez les enfants, elle est de 139 ms en moyenne pour le groupe *Faible MdT* et de 41 ms pour le groupe *Bonne MdT*. Dans l'étude de Barrouillet et Thevenot (2013) portant sur les mêmes opérations avec une population d'adultes eux aussi comparés en fonction de leurs capacités de MdT, elle est de 26 ms pour les moins bons et seulement de 8 ms pour les meilleurs. Il y a une diminution graduelle de la pente parmi ces 4 groupes de population, en fonction de leurs capacités de MdT.

L'effet d'interaction triple vient quant à lui donner du crédit au modèle de comptage lorsqu'on s'intéresse à la forme de la pente et aux prédicteurs. Pour ces éléments, nous obtenons des résultats d'une similarité saisissante entre les deux groupes, et par rapport à l'échantillon total. Au niveau de la pente, nous avons observé que les fonctions linéaire et exponentielle expliquaient de façon tout aussi importante et similaire le pattern de nos TRs pour les opérations non-doubles tant chez les *Bonne MdT* (respectivement $r = .97$ et $r = .98$) que chez les *Faible MdT* (respectivement $r = .89$ et $r = .90$). Nous avons précédemment montré que le modèle de récupération comme le modèle de comptage pouvaient justifier la présence de l'une ou l'autre de ces fonctions et qu'on ne pouvait ainsi pas exclure que les enfants aient recours à du comptage. Ceci dit, le fait que l'interaction entre la taille des deux opérandes soit d'autant plus forte chez les enfants ayant les plus faibles capacités de MdT corrobore encore plus les explications avancées par les modèles de comptage. On peut supposer que cet effet d'interaction vienne de la fatigabilité des enfants : si l'incrémenter du 1^{er} opérande est coûteuse, il est d'autant plus difficile d'incrémenter de manière importante au niveau du 2^{ème} opérande. Le pattern exponentiel pourrait donc venir d'un épuisement au cours de la procédure de comptage. Et les enfants du groupe *Faible MdT* seraient donc plus sujets à cette fatigabilité : incrémenter un 1^{er} opérande élevé mobilise plus de ressources, et il est plus difficile d'incrémenter le 2^{ème} tout en maintenant le 1^{er} en MdT. Ce mécanisme semble d'ailleurs être le même chez tous les enfants. Dans les deux groupes, l'influence de la taille du 2^{ème} opérande sur le 1^{er} opérande est toujours plus importante que l'inverse : les pentes liées à l'augmentation de la taille du 2^{ème} opérande sont plus grandes que celles liées à l'augmentation de la taille du 1^{er}. Il est simplement plus prononcé chez les enfants avec de moindres capacités de MdT, parce que chaque étape de la procédure est ralentie, et/ou parce que la transition entre les deux étapes est plus coûteuse.

Au niveau des prédicteurs, presque tous sortent significativement des analyses. Le 1^{er} opérande ne ressort pour aucun des groupes et étonnamment le maximum ajouté, attribut lié au modèle de comptage, n'est significatif que pour le groupe *Bonne MdT*. Le 2^{ème} opérande, associé au modèle de comptage sort lui aussi plus significativement pour le groupe *Bonne MdT*. Aussi surprenants qu'ils soient, ces résultats ne peuvent néanmoins pas argumenter en faveur d'un modèle de récupération : il y a plus de prédicteurs en faveur d'un modèle de comptage chez les enfants ayant les meilleures capacités de MdT, soit ceux chez qui on attend le plus de récupération. Si l'on s'intéresse aux prédicteurs qui semblent les plus fortement associés, les quatre mêmes attributs ressortent dans les deux groupes, avec des corrélations à plus de 78% : le produit, le minimum ajouté, la somme et la somme au carré. À nouveau, ces résultats sont peu informatifs : il y a autant de prédicteurs en faveur de l'un ou l'autre des modèles. Les résultats de la régression par étape font ressortir un attribut clairement lié au comptage pour le groupe *Faible MdT* (le minimum ajouté) et deux attributs qui s'opposent à première vue (le produit et le 2^{ème} opérande) pour le groupe *Bonne MdT*. Mais comme cela a déjà été mentionné, le produit pourrait être lié à l'effet d'interaction des deux opérandes et donc ne pas avoir de rapport avec de la récupération. Quoi qu'il en soit, dans les deux groupes, ce sont des prédicteurs clairement associés au comptage qui ressortent. Toutefois, leur haute colinéarité, encore très visible au niveau des deux groupes, nous incite à les considérer avec prudence.

Pour les opérations doubles, nous pouvons tirer des conclusions similaires à ce qui a été observé dans l'échantillon total. Dans les deux groupes, ces opérations sont résolues plus rapidement : la différence est en moyenne de 414 ms pour les *Faible MdT* et de 152 ms pour les *Bonne MdT* (cf. Annexe III). La différence de rapidité entre les groupes est néanmoins similaire à celle observée pour les non-doubles, ce qui indique que ces opérations ne sont pas mieux maîtrisées par l'un des deux groupes d'enfants par rapport aux non-doubles. Leurs TRs sont plus constants dans les deux groupes. Aucun effet de taille ne semble se manifester dans les deux groupes: ni la fonction linéaire, ni la fonction exponentielle n'explique le pattern des TRs et aucun prédicteur ne ressort de manière significative. Qui plus est, les pentes associées à ces prédicteurs sont faibles. Là encore, l'analyse au niveau des deux groupes de MdT suggère que les petites additions doubles sont récupérées en mémoire.

Enfin, en ce qui concerne la pertinence de distinguer les opérations non-doubles de type N+1 ou 1+N des autres opérations non-doubles, elle semble là encore utile, voire même d'autant plus intéressante à ce stade de la réflexion. On observe que ce type d'opérations est en moyenne plus vite résolu que les autres opérations non-doubles, et ce dans les deux groupes : la différence est de 449 ms pour les *Faible MdT* et de 99 ms pour les *Bonne MdT* (cf. Annexe III). Cette

sous-catégorisation des opérations non-doubles entraîne une baisse de la variabilité des TRs pour ce type d'opérations, tout particulièrement pour le groupe *Faible MdT*. Si l'on suppose que ces opérations soient résolues par une règle procédurale basique, et que la résolution des additions de manière générale consisterait en une automatisation des procédures plus complexes au cours du développement, alors cela explique pourquoi la différence est moins flagrante pour le groupe *Bonne MdT*. Tous les enfants auraient acquis la procédure simple de résolution des opérations de type $N+1$ ou $1+N$. Mais ceux avec les meilleures capacités de MdT seraient capables d'effectuer presque aussi vite les opérations de format $N+2$, $N+3$, etc. Ils seraient déjà plus avancés en termes de degré d'automatisation atteint.

Nous pouvons ainsi conclure de la manière suivante sur notre seconde hypothèse, qui propose de considérer les différences interindividuelles comme étant le reflet de différences dans le degré d'optimisation d'une même stratégie. Pour corroborer cette hypothèse il fallait avant tout justifier l'utilisation des capacités de mémoire de travail comme facteur d'influence potentiel. Nos résultats montrent clairement que de bonnes capacités de mémoire de travail conduisent à des TRs plus courts. Pour soutenir la perspective d'un comptage qui s'automatise au cours du développement, nous devons montrer que les différences de MdT n'induisent pas de changement de stratégie, soit obtenir des effets similaires ou du moins non-contradictaires avec notre première série d'analyse sur l'échantillon total, et similaires également entre les deux groupes de MdT. Nous avons obtenu des résultats analogues sur ces deux niveaux concernant la forme de la pente et les prédicteurs associés, qui nous conduisent à formuler les mêmes réserves quant à leur informativité. Nous avons obtenu un effet de taille même chez les enfants du groupe *Bonne MdT*, dont la pente reste trop importante pour être expliquée par une stratégie de récupération en mémoire. Par ailleurs, l'effet de la taille des opérands ainsi que de leur interaction sont exacerbés chez les enfants avec les plus faibles compétences en MdT, ce qui corrobore l'hypothèse d'une automatisation du comptage. De manière additionnelle, les résultats de l'analyse en fonction de la MdT soutiennent la subdivision en 3 catégories d'opérations (doubles, non-doubles n'impliquant pas l'opérande 1, non-doubles type $N+1/1+N$). L'existence de règles algorithmiques renforce d'ailleurs la perspective d'un développement allant dans le sens d'une automatisation des procédures.

4.3 Conclusions

4.3.1 Implications théoriques

4.3.1.1 *Dans le développement normal des capacités arithmétiques*

Les résultats que nous avons obtenus chez les enfants de 10-11 ans remettent en cause la conception traditionnelle du développement de la résolution d'additions. Durant ces dernières décennies, il a été admis que les processus de comptage étaient progressivement remplacés par des processus de récupération en mémoire, retrouvés chez l'adulte. Deux recherches récentes ont cependant montré que les processus mis en œuvre chez l'adulte correspondraient toujours et encore, à du comptage (Fayol & Thevenot, 2012; Barrouillet & Thevenot, 2013). Elles ont ainsi envisagé un développement sous la forme d'une automatisation progressive du comptage, en partie tributaire des capacités de MdT.

Les conclusions de notre première hypothèse permettent de conforter les critiques avancées par ces deux nouvelles études. Si nous ne pouvons pas affirmer que les enfants de 10-11 ans comptent, nous pouvons en tout cas dire que les arguments de l'ancienne conception ne suffisent pas pour expliquer nos observations. Nous obtenons des TRs d'environ 1 seconde, soit un temps trop rapide pour que l'enfant (ou le chercheur) puisse consciemment savoir s'il compte ou non. Par ailleurs, nous continuons d'obtenir ce fameux effet de taille, dont l'ampleur ne peut clairement pas être justifiée par les effets de fréquence et d'interférence étant donné le nombre et la taille des opérations investiguées. Qui plus est, notre étude remet en question la pertinence des traditionnels marqueurs utilisés jusqu'à présent pour déterminer quelle était la stratégie sous-jacente. D'un côté, tant le modèle de comptage que celui de la récupération peut justifier la nature de la fonction déterminant le pattern des TRs. On ne peut donc pas s'appuyer sur la forme de la pente des TRs. D'un autre côté, les prédicteurs associés aux différents modèles semblent hautement colinéaires et donc pas assez informatifs pour départager les deux stratégies. Rien ne confirme suffisamment le recours à de la récupération de faits, et rien n'infirme l'hypothèse d'une stratégie de comptage. À ce stade, il faut donc trouver d'autres marqueurs qui seraient incompatibles avec l'un des deux modèles pour être sûr de l'invalidier.

Notre deuxième hypothèse vient conforter les résultats sur l'ensemble du groupe et nous renseigne sur la plausibilité d'un développement en termes d'automatisation du comptage. Premièrement, nous savons avec certitude que les enfants comptent au début de leur développement. Dans nos résultats, rien n'indique que les différences inter-individuelles peuvent s'expliquer par la présence des deux stratégies, quand bien même certains sont plus rapides que d'autres. Nous retrouvons les mêmes effets, les mêmes marqueurs liés aux mêmes

problèmes de pertinence tant dans les deux groupes que par rapport à l'échantillon total. Il n'y a aucun élément qui permette d'infirmer le recours à du comptage, même chez les plus rapides d'entre eux, qui sont, selon les deux conceptions, les enfants qui présentent les meilleures capacités de MdT. Par ailleurs, nous remarquons que les différences interindividuelles se caractérisent par une exacerbation des effets observés chez les enfants avec de moindres capacités de MdT. Cela est parfaitement compatible avec l'hypothèse d'un comptage, qui serait influencé par la fatigabilité de ces enfants. Notons toutefois que ce point ne nous permet pas de discréditer l'hypothèse d'une récupération mnésique.

Enfin, deux autres observations intéressantes méritent d'être approfondies. Elles n'ont été investiguées ici que sur base de comparaison de moyennes et d'écart-types effectuées sur des TRs moyens pour chaque opération. Des analyses statistiques plus rigoureuses devraient être réalisées. Il s'agit du cas des doubles et de opérations de type $N+1$ (et son inverse). La première catégorie d'opérations se distingue des autres en particulier par l'absence d'un effet de taille. De manière consensuelle, on s'accorde à dire actuellement que seule la récupération en mémoire déclarative peut expliquer ce phénomène, même si le modèle sous-jacent mérite d'être précisé. Il ne peut d'ailleurs pas s'expliquer par celui suggéré par Ashcraft et Battaglia (1978). Le cas des doubles est en lui-même un contre-argument pour ce modèle puisqu'il n'est pas à même de les expliquer. Si ces opérations sont aussi récupérées, pourquoi ne sont-elles pas dans le même réseau de faits ? Le cas des opérations $N+1$ (et $N+0$), probablement résolues par des règles algorithmiques très automatisées est, à l'inverse un argument soutenant de la nouvelle conception, comme le proposait déjà Baroody (1983). En effet, une règle est la forme la plus avancée d'une procédure de comptage automatisée, la plus générale, simplifiée, holistique. Elles sont les premières acquises car les plus simples à maîtriser étant donné qu'elles demandent un minimum de manipulation sur la ligne numérique mentale. Ce phénomène va donc pleinement dans le sens d'un développement par automatisation de procédures.

4.3.1.2 Dans le développement pathologique des capacités arithmétiques

Nos observations corroborent la théorie explicative d'un déficit générale de mémoire de travail dans la dyscalculie. Mais elles expliquent son influence d'une autre manière. Cette composante cognitive servirait à automatiser une procédure et à devenir plus efficace dans la manipulation de la ligne numérique plutôt qu'à construire un réseau de faits additifs. Le fait de concevoir que le développement de la résolution d'additions consiste en une automatisation d'une seule et même stratégie renvoie d'autant plus à cette question fondamentale largement discutée dans la littérature sur les troubles des apprentissages: la dyscalculie développementale

est-elle un trouble spécifique ou simplement la partie inférieure d'un seul et même continuum ? En effet, les personnes souffrant de difficultés en arithmétique ne se distinguent pas nettement des autres individus et leurs difficultés peuvent être observées à des degrés variés dans la population générale. Certains auteurs considèrent que la différence se situe surtout dans la capacité ou non à rattraper son retard. Mais il est souvent difficile de savoir à quel point cette capacité est influencée par l'environnement, comme l'adéquation d'un enseignement ou la mise en place d'un cercle vicieux du moment qu'on étiquetterait un enfant comme « mauvais en math » (Jordan et Montani, 1996, cité par Dowker, 2004). Cela n'amoindrit ainsi en rien l'importance de comprendre précisément les processus à l'œuvre dans la résolution des additions, ne serait-ce que pour construire les bons critères diagnostiques nécessaires aux repérages de ces enfants. Ainsi, dire qu'un enfant est dyscalculique car il n'a pas atteint la stratégie de récupération dans la résolution d'additions ne tiendrait plus, puisque même les enfants tout-venants ne semblent pas l'atteindre. Selon nos résultats, leurs difficultés viendraient de leur mauvaise maîtrise des procédures de comptage ou de leur capacité à les automatiser. À ce titre, on pourrait imaginer évaluer ces enfants spécifiquement sur les opérations de type $N+1$ ou $N+0$, les opérations dont la procédure algorithmique est peut-être la plus simple à extraire. Geary (1990) montre que les enfants dyscalculiques privilégient une stratégie de comptage encore moins mature que la stratégie du minimum: le compter-tout. La source est peut-être à chercher vers les connaissances numériques plus fondamentales : la compréhension des principes de dénombrement, voire même du sens du nombre. Cela donne d'autant plus de poids aux théories explicatives arguant pour un trouble primaire lié au dysfonctionnement de structures cérébrales spécialisées (Molko, Wilson & Dehaene, 2005), qui ne sont en aucun cas incompatibles avec la théorie du déficit secondaire de MdT.

4.3.2 Limites de l'étude et perspectives pour la recherche future

Nos résultats remettent ainsi en question une conception théorique largement acceptée depuis une quarantaine d'années. Néanmoins, si des pistes peuvent être avancées, nous ne pouvons pas à l'heure actuelle apporter de réponse précise et indéniable concernant la résolution des additions à l'âge de 10 ans et de son développement en général. Cette étude peut être critiquée sous plusieurs aspects, qui ont probablement leur part explicative dans la lisibilité de nos résultats, et que nous allons énumérer ci-après. Par ailleurs, nos observations indiquent que les éléments sur lesquels se sont basées les études jusqu'à présent ont leurs faiblesses et ne sont pas aussi informatifs qu'on peut le croire. Des explications alternatives peuvent souvent être

énoncées, les résultats sont souvent à nuancer au regard d'autres facteurs. Des recherches complémentaires doivent encore être menées pour approfondir cette problématique.

Bien que notre étude ait tenté de palier les faiblesses méthodologiques des précédentes, elle n'est pas irréprochable sur ce plan pour autant. On pourrait ainsi clairement critiquer la taille de notre échantillon : 36 sujets pour le groupe total, et seulement 27 pour les analyses incluant les capacités de mémoire de travail. À défaut d'un grand nombre de participants, nous avons par contre une quantité de données plus intéressante pour chaque enfant, avec 6 présentations pour chaque opération. D'ailleurs, au final, nous avons réussi à capter tous les effets significatifs souhaités, en particulier l'effet de taille des deux opérands et l'effet des capacités de MdT. L'homogénéité de notre échantillon n'en reste néanmoins pas parfaite. Plusieurs variables n'ont pas été exactement contrôlées, comme l'établissement scolaire (ou le genre dans une moindre mesure), et ce pour des raisons classiques de disponibilité des élèves. On pourrait en effet imaginer que les élèves des écoles de différents quartiers de Genève n'ont pas tous le même niveau en arithmétique. Cependant, deux éléments nous laissent croire que cela n'a pas d'influence sur nos résultats : le haut taux de réponse correcte (entre 89 et 100%), ainsi qu'un nettoyage rigoureux des données qui ne nous a fait perdre qu'un participant au final. Un autre reproche que l'on peut adresser à une étude qui remet en question des recherches ayant plus de 40 ans est la possibilité d'un effet de cohorte : les enfants étudiés en 1972 par Groen et Parkman ou en 1978 par Ashcraft et Battaglia sont peut-être meilleurs en arithmétique que ceux de notre époque. De ce fait, les enfants de 10 ans « actuels » n'auraient pas encore atteint le passage à la récupération mnésique selon l'ancienne conception. Deux éléments rendent toutefois cet effet peu probable. Premièrement, les TRs associés aux petites additions sont environ entre 1250 et 3000 ms pour des enfants de 10 ans de cette époque (Svenson, 1975). Or, nos participants, qui ont 10-11 ans montrent des TRs moyens de 1110 ms. Chez Groen et Parkman (1972), les TRs sont en moyenne de 3130 pour des enfants de 6-7 ans, qui logiquement devraient être moins bons que des enfants de 10-11 ans. L'effet de cohorte ne tient donc pas en regardant les valeurs des TRs, mêmes ceux issus d'études impliquant des tâches de production. Deuxièmement, les enfants de ces époques sont finalement devenus les sujets adultes des études plus récentes (Fayol & Thevenot, 2012 ; Barrouillet & Thevenot, 2013). Et ces études ont justement montré un recours aux stratégies de comptage pour les petites additions. Pour conclure sur les limites de cette étude, l'une des moins négligeables est le fait de ne s'intéresser en fin de compte qu'à une toute petite partie des additions. Mais ces 16 additions simples sont les plus fréquentes à l'école et parmi les plus utilisées au quotidien. Il s'agissait aussi d'un choix pleinement conscient de ne s'attarder que sur ces opérations dans cette recherche. Le but était

justement de prendre le cas le plus extrême, le moins controversé jusqu'alors, pour remettre en cause une théorie trop longtemps admise et trop peu discutée. Cette étude n'est donc bien que le début d'une longue série de remises en question, d'approfondissements et de nouvelles recherches, pour lesquelles nous pouvons donner quelques pistes.

Pour conforter la vision de la nouvelle conception, deux types d'études peuvent encore être menées. La première impliquerait de répliquer cette expérience chez une population d'enfants surdoués, les plus rapides et de ce fait les plus proches des adultes dans cette habileté. Autrefois, leurs performances laissaient supposer qu'ils utilisaient principalement une stratégie de récupération à 9-10 ans (Geary & Brown, 1991). Mais il pourrait également s'agir d'un comptage fortement automatisé, très certainement associé à de bonnes capacités de MdT. Ainsi, si même les enfants les plus proches des adultes cognitivement ne récupèrent pas, cela serait un argument supplémentaire en faveur d'un développement par automatisation des procédures de comptage. La seconde serait une étude d'entraînement. La récupération comme le comptage étant deux stratégies qui s'établissent par l'apprentissage, on peut ainsi prendre le problème sous un autre angle : observer laquelle des deux peut être entraînée afin de déterminer celle qui est naturellement à l'œuvre. On peut s'inspirer de l'étude de Fayol et Thevenot (2012) et comparer un set d'additions, de soustractions et de multiplications, une partie de chacune de ces opérations étant soumise à une condition expérimentale d'entraînement. On s'attendrait ainsi à une généralisation des effets de l'entraînement seulement pour les opérations impliquant le recours à du comptage, étant donné que l'entraînement aurait sollicité une procédure plus générale, non-spécifique à un fait arithmétique.

Par la suite, on pourra bien évidemment répliquer cette étude en l'étendant à un set plus large d'additions, en commençant par celles ayant des sommes jusqu'à 10. Les mémoires de maîtrise de Higuel (2013) et Meyer (2013) ont déjà été dans ce sens. Ces dernières ont mis en évidence le recours à plusieurs stratégies de comptage chez des enfants de 10 ans, ainsi que des niveaux de rapidité et de justesse différents dans la résolution qu'il serait intéressant de mettre en regard des capacités de mémoire de travail des enfants. Par ailleurs, nos résultats indiquent que parmi nos 16 opérations, déjà 3 types de processus semblent à l'œuvre, ce qui nous incite clairement à investiguer très précisément ces additions simples.

Il semble aussi indispensable d'étudier l'évolution de la résolution d'additions dans une perspective développementale, mais cette fois-ci à la lumière de la nouvelle conception et avec une méthodologie plus rigoureuse. Une étude de type longitudinale serait évidemment la méthode idéale et la plus précise, puisqu'elle permettrait de prendre en compte les différences interindividuelles. Il serait ainsi intéressant de suivre un même groupe d'enfant sur le décours

de leur scolarité obligatoire, voire même à l'âge adulte. S'il semble conceptuellement peu probable d'utiliser du comptage, puis de la récupération, puis de revenir à du comptage à l'âge adulte, aucune étude ne l'a encore montré. Cela permettrait par ailleurs de voir si certaines caractéristiques ont une influence sur ces processus, peut-être à un moment différent au cours du développement. Enfin, si les capacités de mémoire de travail semblent expliquer en partie les différences interindividuelles des enfants à 10 ans, d'autres facteurs entrent certainement en jeu. On pourrait ainsi investiguer d'autres capacités comme l'attention, le raisonnement logique, ou encore d'autres habiletés arithmétiques telles que les représentations non-symboliques du nombre. Il serait aussi intéressant d'approfondir les capacités de la mémoire de travail en elle-même et de voir si l'une de ses fonctions est plus déterminante qu'une autre: est-ce une question de simple stockage, de capacité de mise à jour ou de résistance à l'interférence ? Ces connaissances pourraient s'avérer utiles dans l'orientation des activités d'entraînement à proposer dans l'enseignement et en rééducation.

4.3.3 Implications pratiques pour l'enseignement et la rééducation

Les implications pratiques ont été regroupées pour ces deux domaines d'application car les activités numériques qui les composent sont relativement similaires. La grande différence repose principalement dans le caractère individuel, personnalisé et l'intensité de la prise en charge, éléments qui influeraient sans doute en eux-mêmes sur leur efficacité (INSERM, 2007). Même, ces éléments sont finalement retrouvés dans les recommandations pour la création de programmes d'intervention scolaires adaptés (Dowker, 2009).

Il existe un nombre important de programmes d'intervention, informatisés ou non, applicables pour des enfants d'âge pré-scolaire et scolaire, clairement diagnostiqués comme ayant des difficultés arithmétiques ou à risque d'en développer. Leur efficacité, et en particulier le maintien d'effets à long-terme n'a cependant pas toujours été évalué. Mais, on peut dire que de manière générale, ces programmes d'intervention semblent être réellement efficaces du moment qu'ils ciblent les points les plus déficitaires des enfants et proposent des exercices adaptés (INSERM, 2007). A priori donc, les potentielles inexacitudes de la conception théorique traditionnelle n'ont jusque-là pas eu des répercussions catastrophiques sur l'intervention. Pourtant, certains programmes ciblent clairement des aspects que notre conception remettrait en question. Par exemple, le programme *FASTT Math*, encore testé dernièrement par Hasselbring et Goin (2005), s'appuie exactement sur l'idée de développer la capacité à retrouver les faits numériques en MLT de manière rapide et non-coûteuse, avec un entraînement systématique et progressif d'additions simples. Ce programme semble avoir

montré son efficacité (Hasselbring et al., 1988, cité par INSERM, 2007). Cela va à l'encontre de notre étude qui indique plutôt que l'on n'utiliserait jamais cette récupération. Le but ici n'est pas de contester l'efficacité de ces programmes, mais plutôt de nuancer ce qu'ils considèrent comme raison de leur efficacité. En regardant plus en détail la méthode *FASTT Math*, on voit que l'entraînement des faits additifs se fait dans un ordre bien précis, en travaillant un nombre restreint d'opérations : l'enfant travaille d'abord tous les problèmes de type $N+1$, puis leur inverse $1+N$, puis les $N+2$, puis les $2+N$ etc. Ainsi, ce n'est peut-être pas le fait de présenter systématiquement l'opération et le résultat qui renforce la maîtrise de cette opération, mais simplement l'activité de comparer que le résultat de $4+3$ diffère de 2 « pas » du résultat de $4+1$, que l'on a travaillé juste avant. Cet exercice entraîne à manipuler, concevoir et préciser sa ligne numérique mentale. De même, travailler à chaque fois une opération puis son inverse permet de dégager le principe de l'inversion, et non les deux faits isolément (ce que les chercheurs expliquent d'ailleurs de la même manière). Il est donc bien question de conduire les enfants à manier des règles algorithmiques, à les assimiler dans un certain ordre, et à automatiser le comptage jusqu'à ce qu'il atteigne ce stade ultime.

Un autre élément explique pourquoi ces programmes sont efficaces, et le resteront. Actuellement, la recherche montre que différentes méthodes permettent d'améliorer les compétences numériques. On peut entraîner des procédures, mais aussi travailler au niveau des concepts, la meilleure façon résidant même dans l'établissement de connexions entre concepts et procédures (Baroody & Dowker, 2003, cité par Thevenot & Masson, 2013). Il est aussi question d'entraîner les correspondances entre toutes les représentations du nombre, symboliques et non-symboliques, le but étant finalement de dégager le sens du nombre. Des activités liées au placement des nombres sur sa ligne numérique mentale ou à la manipulation des nombres sur cette ligne sous toutes leurs formes ont montré leur efficacité. On peut citer à titre d'exemple les effets positifs du programme de *La course aux nombres*, qui se déroule sous la forme d'un jeu de l'oie et qui utilise diverses représentations des nombres (Wilson, Revkin, Cohen, Cohen, Dehaene, 2006, cité par Thevenot & Masson, 2013). De ce fait, ces programmes tentent souvent de concilier toutes les formes de savoirs, et c'est peut-être au niveau de cette richesse et de la multitude des méthodes que réside leur intérêt.

Notre étude suppose donc que le développement se fait plus dans le sens d'une automatisation d'une même stratégie : le comptage. Une telle conception est ainsi très encourageante pour aider les enfants ayant des difficultés en arithmétique vu que rien que l'entraînement de ces procédures contribuerait déjà en grande partie à leur amélioration.

5. Bibliographie

- American Psychiatric Association, « Diagnostic and statistical manual of mental disorders DSM-IV », *American Psychiatric Pub*, 1994
- Ashcraft, M. H. (1982). The development of cognitive arithmetic: A chronometric approach. *Developmental Review*, 2, 213-236.
- Ashcraft, M. H. (1992). Cognitive arithmetic: A review of data and theory. *Cognition*, 44(1-2), 75-106. doi: 10.1016/0010-0277(92)90051-1
- Ashcraft, M. H., & Battaglia, J. (1978). Cognitive arithmetic: Evidence for retrieval and decision processes in mental addition. *Journal of Experimental Psychology: Human Learning and Memory*, 4(5), 527-538. doi:10.1037/0278-7393.4.5.527
- Ashcraft, M. H., & Fierman, B. A. (1982). Mental addition in third, fourth, and sixth graders. *Journal of Experimental Child Psychology*, 33(2), 216-234. doi: 10.1016/0022-0965(82)90017-0
- Ashcraft, M.H., & Christy, K. S. (1995). The frequency of arithmetic facts in elementary texts: Addition and multiplication in grades 1-6. *Journal for Research in Mathematics Education*, 5, 396-421.
- Ashcraft, M.H., & Stazyk, E.H. (1981). Mental addition: A test of three verification models. *Memory & Cognition*, 9, 185-196.
- Baddeley, A. D., & Hitch, G. (1974). Working memory. *Psychology of learning and motivation*, 8, 47-89.
- Baroody, A.J. (1983). The development of procedural knowledge: An alternative explanation for chronometric trends of mental arithmetic. *Developmental Psychology*, 3, 225-230.
- Baroody, A. J. (1984). A reexamination of mental arithmetic models and data: A reply to Ashcraft. *Developmental Review*, 4(2), 148-156. doi: 10.1016/0273-2297(84)90004-2
- Baroody, A. J. (1994). An evaluation of evidence supporting fact-retrieval models. *Learning and Individual Differences*, 6(1), 1-36. doi: 10.1016/1041-6080(94)90013-2
- Baroody, A. J., & Ginsburg, H. P. (1986). The relationship between initial meaningful and mechanical knowledge of arithmetic. In *Conceptual and procedural knowledge: The case of mathematics* (pp. 75-112). Hillsdale, NJ, England: Lawrence Erlbaum Associates, Inc.

- Barrouillet, P., & Camos, V. (2007a). Le développement de la mémoire de travail. *Psychologie du développement et de l'éducation*, 51-86.
- Barrouillet, P., & Camos, V. (2007b). The time-based resource-sharing model of working memory. *The cognitive neuroscience of working memory*, 59-80.
- Barrouillet, P., & Fayol, M. (1998). From algorithmic computing to direct retrieval: Evidence from number and alphabet arithmetic in children and adults. *Memory & Cognition*, 26, 355-368.
- Barrouillet, P., & Lépine, R. (2005). Working memory and children's use of retrieval to solve addition problems. *Journal of Experimental Child Psychology*, 91(3), 183-204. doi:10.1016/j.jecp.2005.03.002
- Barrouillet, P., Lépine, R., & Camos, V. (2008). Is the influence of working memory capacity on high-level cognition mediated by complexity or resource-dependent elementary processes?. *Psychonomic Bulletin & Review*, 15(3), 528-534.
- Barrouillet, P., & Thevenot, C. (2013). On the problem-size effect in small additions: Can we really discard any counting-based account? *Cognition*, 128(1), 35-44. doi:10.1016/j.cognition.2013.02.018
- Campbell, J. I. D. (1995). Mechanisms of single addition and multiplication: A modified network-interference theory and simulation. *Mathematical Cognition*, 1, 121-164.
- Case, R., Kurland, D. M., & Goldberg, J. (1982). Operational efficiency and the growth of short-term memory span. *Journal of experimental child psychology*, 33(3), 386-404.
- Cowan, H., Saults, J. S., Elliott, E. M. (2002). The search for what is fundamental in the development of working memory. *Advances in child development and behaviour*, 29, 1- 49.
- Dehaene, S. (1992). Varieties of numerical abilities. *Cognition*, 44, 1-42.
- Dowker, A. D. (2004). *What works for children with mathematical difficulties?* London, UK: Department for Children, Schools and Families.
- Dowker, A. D. (2009). *What works for children with mathematical difficulties: The effectiveness of intervention schemes.* London: Department for Children, Schools and Families.

- Ericsson, K. A., & Simon, H. A. (1993). *Protocol analysis: Verbal reports as data* (rev. ed.). Cambridge, MA: Bradford/MIT Press.
- Fayol, M., & Thevenot, C. (2012). The use of procedural knowledge in simple addition and subtraction problems. *Cognition*, *123*(3), 392–403.
- Forster, K. I., & Forster, J. C. (2003). DMDX: A window display program with millisecond accuracy. *Behavior, Research Methods, Instruments and Computers*, *35*, 116-124.
- Geary, D.C. (1990). A componential analysis of early learning deficit in mathematics. *Journal of Experimental Child Psychology*, *49*, 363–383.
- Geary, D. C. (2004). Mathematics and Learning Disabilities. *Journal of Learning Disabilities*, *37*(1), 4–15. doi: 10.1177/00222194040370010201
- Geary, D. C. (2005). Les troubles d'apprentissage en arithmétique: rôle de la mémoire de travail et des connaissances conceptuelles. *La dyscalculie*. Marseille: Solal.
- Geary, D.C., Brown, S.C., & Samaranayake, V.A. (1991). Cognitive addition: A short longitudinal study of strategy choice and speed of processing differences in normal and mathematically disabled children. *Developmental Psychology*, *28*(5), 787–797.
- Geary, D.C., Widaman, K.F., Little, T.D., & Cormier, P. (1987). Cognitive addition : Comparison of learning disabled and academically normal elementary school children. *Cognitive Development*, *2*(3), 249-269.
- Groen, G. J., & Parkman, J. M. (1972). A chronometric analysis of simple addition. *Psychological Review*, *79*(4), 329–343. doi: 10.1037/h0032950
- Groen, G., & Resnick, L. B. (1977). Can preschool children invent addition algorithms?. *Journal of Educational Psychology*, *69*(6), 645.
- Hasselbring, T. S., & Goin, L. (2005). Research foundation and evidence of effectiveness for FASTT Math. Retrieved September, 16, 2005.
- Higel, M. (2013). *Résolution des additions simples chez l'enfant*. Maîtrise : Univ. Genève.
- Hitch, G. J., & McAuley, E. (1991). Working memory in children with specific arithmetical learning difficulties. *British Journal of Psychology*, *82*(3), 375-386.
- Hughes, M. (1981). Can pre-school children add and subtract? *Educational Psychology*, *1*, 207-219.

- INSERM (2007). Dyscalculie et troubles de l'apprentissage de l'arithmétique (291-332). *Dans Dyslexie, Dysorthographe, Dyscalculie : Bilan des données scientifiques*. Paris : Inserm.
- Jordan, N.C., Hanish, I.B., Kaplan, D. (2003b) A longitudinal study of mathematical competencies in children with specific mathematics difficulties versus children with comorbid mathematics and reading difficulties. *Child Development, 74*, 834-850
- Jordan, N.C., Montani, T.O. (1997) Cognitive arithmetic and problem solving: A comparison of children with specific and general mathematics difficulties. *Journal of Learning Disabilities, 30*, 624-634
- Kreutzer, M. A., Leonard, C., Flavell, J. H., & Hagen, J. W. (1975). An interview study of children's knowledge about memory. *Monographs of the society for research in child development, 1-60*.
- LeFevre, J., Sadesky, G.S., & Bisanz, J. (1996). Selection of procedures in mental addition: Reassessing the problem size effect in adults. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition, 22*, 216-230.
- LeFevre, J.-A., Shanahan, T., & DeStephano, D. (2004). The tie effect in simple arithmetic: An access-based account. *Memory & Cognition, 32*, 1019–1031.
- Lemaire, P., Abdi, H., & Fayol, M. (1996). The role of working memory resources in simple cognitive arithmetic. *European Journal of Cognitive Psychology, 8*, 73-103.
- Lépine, R., Barrouillet, P., & Camos, V. (2005). What makes working memory spans so predictive of high-level cognition? *Psychonomic Bulletin and Review, 12*, 165-170.
- Logan, G. D. (1988). Toward an instance theory of automatization. *Psychological Review, 95*(4), 492–527. doi:10.1037/0033-295X.95.4.492
- Logan, G. D., & Klapp, S. T. (1991). Automating alphabet arithmetic: I. Is extended practice necessary to produce automaticity?. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition, 17*(2), 179.
- Meyer, B. (2013). *Résolution des additions simples chez l'enfant*. Maîtrise : Univ. Genève.
- Miller, G. A. (1956). The magical number seven, plus or minus two: some limits on our capacity for processing information. *Psychological review, 63*(2), 81.

- Molko, N., Wilson, A., & Dehaene, S. (2005). La dyscalculie développementale, un trouble primaire de la perception des nombres. *Revue française de pédagogie*, 41-47.
- Noël, M. P. (2005). *La dyscalculie: trouble du développement numérique de l'enfant*. Groupe de Boeck.
- Roussel, J. L., Fayol, M., & Barrouillet, P. (2002). Procedural vs. direct retrieval strategies in arithmetic: A comparison between additive and multiplicative problem solving. *European Journal of Cognitive Psychology*, 14(1), 61-104.
- Rousselle, L. (2005). Le point sur la question des compétences numériques précoces. *La dyscalculie: trouble du développement numérique de l'enfant*.
- Seron, X., & Pesenti, M. (1999). Le calcul et ses troubles chez l'enfant. In J.A. Rondal & X. Seron (Eds.), *Troubles du langage. Bases théoriques, diagnostic et rééducation* (pp.799-820), Liège : Mardaga.
- Siegler, R. S. (1987). The perils of averaging data over strategies: An example from children's addition. *Journal of Experimental Psychology: General*, 116(3), 250-264. doi:10.1037/0096-3445.116.3.250
- Siegler, R. (1996). *Emerging Mind: The process of change in children's thinking*. Oxford University Press.
- Siegler, R. S., & Robinson, M. (1982). The development of numerical understandings. In H. W. Reese & L.P. Lipsitt (Eds.), *Advances in child development and behaviour* (Vol. 16, pp. 241-312). New York: Academic Press.
- Siegler, R.S., & Shrager, J. (1984). Strategy choices in addition and subtraction: How do children know what to do? In C. Sophian (Ed.), *Origins of cognitive skills* (pp. 229-293). Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates, Inc.
- Starkey, P. (1992). The early development of numerical reasoning. *Cognition*,43(2), 93-126.
- Stazyk, E. H., Ashcraft, M. H., & Hamann, M. S. (1982). A network approach to mental multiplication. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 8(4), 320.
- Svenson, O. (1975). Analysis of time required by children for simple additions. *Acta Psychologica*, 39(4), 289-301.

- Svenson, O., & Broquist, S. (1975). Strategies for solving simple addition problems: A comparison of normal and subnormal children. *Scandinavian Journal of Psychology*, 16(1), 143-148.
- Temple, C. M. (1992). Developmental dyscalculia. *Handbook of neuropsychology*, 7, 211-211.
- Thevenot, C., Barrouillet, P., Castel, C., Uittenhove, K. (sous presse). Ten-year-old children strategies in mental addition: a counting model account.
- Thevenot, C., & Masson, S. (2013). Améliorer les compétences numériques. *ANAE. Approche neuropsychologique des apprentissages chez l'enfant*, (123), 182-188.
- Wechsler, D., & Kort, W. (2005). *WISC-IIIInl: Wechsler intelligence scale for children*. Harcourt Assessment.
- Widaman, K. F., Geary, D. C., Cormier, P., & Little, T. D. (1989). A componential model for mental addition. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory and Cognition*, 15, 898-919.
- Wynn, K. (1992). Addition and subtraction by human infants. *Nature*, 358, 749-750.
- Wynn, K. (1995). Origins of numerical knowledge. *Mathematical cognition*, 1(1), 35-60
- Zbrodoff, N. J., & Logan, G. D. (2005). What everyone finds. The problem-size effect. In J. I. D. Campbell (Ed.), *Handbook of Mathematical Cognition* (pp. 331-345). New-York and Hove: Psychology press.

6. Annexes

Annexe I : Liste exhaustive des opérations permettant d'aboutir à une même somme pour les additions à 2 opérands dont le résultat est entre 2 et 8.

<i>Somme</i>	<i>Additions correspondantes</i>	<i>Nombre total d'additions (opérations inverses incluses)</i>
2	1+1, 2 + 0, 0 + 2	3
3	2+1, 1+2, 3 + 0, 0 + 3	4
4	1+3, 3+1, 2+2, 4 + 0, 0 + 4	5
5	4+1, 1+4, 2+3, 3+2, 5 + 0, 0 + 5	6
6	3+3, 2+4, 4+2, 5 + 1, 1 + 5, 6 + 0, 0 + 6	7
7	3+4, 4+3, 5 + 2, 2 + 5, 6 + 1, 1 + 6, 7 + 0, 0 + 7	8
8	4+4, 5 + 3, 3 + 5, 6 + 2, 2 + 6, 7 + 1, 1 + 7, 8 + 0, 0 + 8	9

Annexe II : moyennes et écart-types des TRs moyens pour l'échantillon total selon la sous-catégorisation des types d'opérations.

<i>Opération</i>	<i>TRs moyens associés (ms)</i>	<i>Moyenne et écart-type des TRs moyens (ms)</i>		<i>Catégories d'opérations</i>
1 + 1	921	921 (7)		Doubles
2 + 2	925			
3 + 3	911			
4 + 4	926			
2 + 1	1008	1173 (123)	1063 (52)	N+1
3 + 1	1069			
4 + 1	1040			
1 + 2	1026			
1 + 3	1081	1173 (123)		1+N
1 + 4	1154			
2 + 3	1277			
2 + 4	1313			
3 + 2	1210	1284 (39)		Non-doubles n'impliquant pas l'opérande 1
3 + 4	1299			
4 + 2	1315			
4 + 3	1288			

Annexe III : moyennes et écart-types des TRs moyens pour chaque groupe de MdT selon la sous-catégorisation des types d'opérations.

GROUPE FAIBLE MDT					
<i>Opération</i>	<i>TRs moyens associés (ms)</i>	<i>Moyenne et écart-type des TRs moyens (ms)</i>			<i>Catégories d'opérations</i>
1 + 1	921	976 (23)			Doubles
2 + 2	925				
3 + 3	911				
4 + 4	926				
2 + 1	1008	1390 (244)	1166 (73)	1126 (27)	N+1
3 + 1	1069				
4 + 1	1040		1206 (89)	1+N	
1 + 2	1026				
1 + 3	1081				
1 + 4	1154	1615 (67)	Non-doubles n'impliquant pas l'opérande 1		
2 + 3	1277				
2 + 4	1313				
3 + 2	1210				
3 + 4	1299				
4 + 2	1315				
4 + 3	1288				

GROUPE BONNE MDT					
<i>Opération</i>	<i>TRs moyens associés (ms)</i>	<i>Moyenne et écart-type des TRs moyens (ms)</i>			<i>Catégories d'opérations</i>
1 + 1	921	885 (42)			Doubles
2 + 2	925				
3 + 3	911				
4 + 4	926				
2 + 1	1008	1037 (65)	987 (41)	961 (24)	N+1
3 + 1	1069				
4 + 1	1040		1014 (39)	1+N	
1 + 2	1026				
1 + 3	1081				
1 + 4	1154	1086 (42)	Non-doubles n'impliquant pas l'opérande 1		
2 + 3	1277				
2 + 4	1313				
3 + 2	1210				
3 + 4	1299				
4 + 2	1315				
4 + 3	1288				

Annexe IV : tableau détaillé des TRs moyens des 36 participants pour chaque opération, comprenant la répartition dans les groupes de MdT en fonction de leur score à la tâche de mémoire de chiffre.

N° sujet	Age	Score MdT	Groupe MdT	Moyenne des TRs après correction (ms)																Moyenne des TRs pour les doubles (ms)	Moyenne des TRs pour les non-doubles (ms)
				1+1	1+2	1+3	1+4	2+1	2+2	2+3	2+4	3+1	3+2	3+3	3+4	4+1	4+2	4+3	4+4		
50	11,42	7	Faible MdT	1022	1140	1120	1144	1032	1023	1710	1675	1333	1646	896	1834	1010	1678	1515	966	976	1403
10	10,50	9	Faible MdT	861	1941	1334	2049	1528	1317	2083	2214	1340	1932	1669	2376	1919	2250	3340	1559	1351	2027
15	11,33	9	Faible MdT	1211	1533	2251	1450	1393	1388	3559	2734	1608	2780	1152	3260	1523	2786	2773	1077	1207	2304
27	10,23	9	Faible MdT	1452	1618	1363	2495	1789	1091	4771	2731	1589	4051	1599	2866	1314	3111	3780	1147	1322	2623
1	11,25	10	Faible MdT	1006	881	1065	956	867	933	1028	1110	985	861	1017	1006	925	1090	927	918	969	975
14	10,83	10	Faible MdT	980	1076	1451	1120	1097	942	1324	1902	1208	1474	970	1803	1094	1529	1762	910	950	1402
16	10,50	10	Faible MdT	791	722	923	976	796	801	1330	1230	857	1341	800	1458	765	1885	1277	874	816	1147
19	10,50	10	Faible MdT	1031	886	903	1309	934	850	1105	1003	867	939	826	1040	1024	844	892	812	879	979
22	10,25	10	Faible MdT	899	1504	1028	1548	1270	994	1317	2601	1719	1577	1065	1517	1420	2119	1125	1510	1117	1362
33	10,08	10	Faible MdT	715	875	1003	824	896	683	893	1107	881	989	817	971	866	1205	856	784	750	947
34	10,00	10	Faible MdT	1141	1241	2071	1684	1497	1201	1856	1998	1370	1275	975	1803	1373	1884	1720	803	1030	1648
35	10,58	10	Faible MdT	772	838	768	1074	871	816	980	1068	827	771	694	789	1145	868	844	713	749	904
38	10,58	10	Faible MdT	814	691	712	701	682	704	643	834	717	624	855	763	693	797	738	694	767	716
46	10,83	10	Faible MdT	748	702	891	800	710	840	857	990	813	738	805	770	758	1042	890	704	774	830
6	10,58	11		847	868	827	871	841	875	769	740	782	819	781	910	818	740	860	787	822	820
37	11,25	11		1192	1108	1458	1742	1482	728	879	1779	1410	950	802	1253	1747	1839	1695	1038	940	1445
45	10,00	11		983	960	895	833	787	760	1030	1131	1030	1085	911	1032	1020	1281	1075	766	855	1015
5	10,08	12		930	1011	1065	1349	971	1212	1138	1373	1207	1061	1105	1284	1185	1475	1272	1022	1067	1199
7	10,58	12		819	799	819	923	780	852	911	826	892	933	796	677	760	922	822	840	827	839
9	10,00	12		886	1236	963	1290	945	970	906	934	1269	1132	963	854	1331	897	980	957	944	1061
13	11,08	12		713	1051	1112	1018	1148	773	1185	1259	932	1259	944	1294	943	1188	1177	1138	892	1131
29	10,42	12		836	868	862	979	829	856	912	1183	1204	1118	909	1255	870	1116	1095	796	849	1024
36	10,50	12		768	756	773	797	750	775	738	681	792	774	764	871	729	705	790	834	790	763

N° sujet	Age MDT	Score MDT	Groupe MDT	Moyenne des TRs après correction (ms)																Moyenne des TRs pour les doubles (ms)	Moyenne des TRs pour les non-doubles (ms)
				1+1	1+2	1+3	1+4	2+1	2+2	2+3	2+4	3+1	3+2	3+3	3+4	4+1	4+2	4+3	4+4		
11	10,42	13	Bonne MdT	755	831	838	1052	789	814	863	889	817	861	695	868	829	799	849	736	750	857
18	10,08	13	Bonne MdT	902	1134	1173	1077	1214	866	964	728	880	1139	639	1155	938	640	995	846	813	1003
30	10,08	13	Bonne MdT	765	673	717	803	667	727	721	734	704	819	729	711	802	721	731	648	718	734
47	10,92	13	Bonne MdT	856	913	882	714	791	782	801	874	904	845	748	920	736	819	987	762	787	849
4	10,42	14	Bonne MdT	1184	1294	1174	1503	1261	1124	1343	1307	1177	1270	1323	1492	1563	1363	1263	1376	1232	1334
31	10,42	14	Bonne MdT	666	753	811	830	726	718	836	688	750	782	718	660	701	780	684	704	702	751
44	10,08	14	Bonne MdT	1273	1099	1323	1340	1280	1018	969	1387	1304	869	939	1807	1079	1395	1534	1271	1125	1282
3	11,17	15	Bonne MdT	1183	1484	1744	1768	1189	1504	2113	2590	1632	1380	1266	1688	1464	2093	1208	1152	1276	1696
43	10,00	15	Bonne MdT	745	909	883	887	894	808	815	789	877	767	730	915	724	701	860	852	784	835
48	10,50	15	Bonne MdT	996	834	899	928	908	874	907	875	898	986	744	865	922	764	930	881	874	895
51	10,25	15	Bonne MdT	950	1051	1091	876	1127	1011	1069	1013	1125	1271	706	1025	887	1034	1077	851	880	1054
41	10,67	16	Bonne MdT	676	763	746	748	728	788	1141	1142	772	1116	733	1509	677	937	1583	828	756	989
49	10,42	18	Bonne MdT	778	863	1007	1092	834	889	1323	1125	997	1297	726	1456	906	2031	1473	732	786	1200