



Thèse

2019

Open Access

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

---

## Le rôle du comptage sur les doigts dans le développement des habiletés arithmétiques

---

Dupont, Justine

### How to cite

DUPONT, Justine. Le rôle du comptage sur les doigts dans le développement des habiletés arithmétiques. Doctoral Thesis, 2019. doi: 10.13097/archive-ouverte/unige:120899

This publication URL: <https://archive-ouverte.unige.ch/unige:120899>

Publication DOI: [10.13097/archive-ouverte/unige:120899](https://doi.org/10.13097/archive-ouverte/unige:120899)



**UNIVERSITÉ  
DE GENÈVE**

FACULTÉ DE PSYCHOLOGIE  
ET DES SCIENCES DE L'ÉDUCATION

Section de Psychologie

Sous la direction de Catherine Thevenot et Pierre Barrouillet

---

# Le rôle du comptage sur les doigts dans le développement des habiletés arithmétiques

## **THESE**

Présentée à la  
Faculté de psychologie et des sciences de l'éducation  
de l'Université de Genève  
pour obtenir le grade de Docteur en Psychologie  
par

**Justine DUPONT**

de  
France

Thèse No 733

GENEVE

Juin 2019

N° d'étudiant : 10-336-204



## Résumé

Chez des enfants à développement ordinaire, une relation à priori surprenante a été observée entre leurs performances en arithmétique et leurs performances au test de gnosie digitale, mesurant leur perception tactile des doigts sans contrôle visuel. Toutefois, nos données ne montrent aucun effet de la gnosie digitale sur les performances arithmétiques chez les enfants âgés en moyenne de 6 ans quand on contrôle les effets de la mémoire de travail et de l'intelligence non verbale sur cette relation. Plus généralement, peu d'études ont abordé la question des raisons qui seraient susceptibles d'expliquer le lien entre gnosie digitale et performances arithmétiques. L'une des propositions est de considérer le comptage sur les doigts comme médiateur de la relation. Cependant, l'une des interprétations de nos résultats est que la relation entre gnosie digitale et compétences en arithmétique pourrait être dépendante de facteurs cognitifs plus généraux.

Dans cette thèse, nous nous sommes également intéressés à l'étude du lien entre l'utilisation des doigts pour calculer et les performances arithmétiques des enfants âgés en moyenne de 6 ans. La relation entre comptage sur les doigts dans des tâches de calcul et habiletés arithmétiques chez les jeunes enfants a déjà été documentée par quelques travaux en psychologie développementale. Nous nous sommes particulièrement attachés à déterminer les caractéristiques cognitives des enfants qui calculent sur leurs doigts. De manière intéressante, nous avons observé que les enfants qui calculent sur leurs doigts sont les enfants avec de fortes capacités en mémoire de travail. De plus, dans une démarche de recherche longitudinale, nous avons voulu déterminer l'évolution de l'utilisation du comptage sur les doigts dans une tâche de calcul et des performances en arithmétique. Pour cela, nous avons suivi l'évolution, tant au niveau de l'utilisation des doigts pour calculer que des performances à la tâche de calcul, des enfants âgés de 6 à 8 ans. Les profils des enfants concernant leurs capacités en mémoire de travail ont aussi été dégagés. L'évolution des stratégies de comptage sur les doigts dans une tâche de calcul a également retenu notre attention. Nos résultats suggèrent que calculer sur ses doigts tôt et abandonner cette stratégie rapidement est le meilleur profil pour réussir les additions ultérieurement. Et de manière intéressante, nous avons également observé que les enfants qui s'extraient de leurs doigts rapidement sont non seulement les enfants qui utilisent le plus la stratégie sophistiquée "Min" l'année précédente et correspondent également aux enfants avec les plus fortes capacités en mémoire de travail. Des conclusions théoriques et pédagogiques ont été tirées de ces observations.



## Abstract

A surprising relationship has been observed in typical children between their arithmetic capacities and their performance in a finger gnosis test measuring their tactile perception without visual control. However, our results shows that, in 6-year-old children, there is no specific relation between finger gnosis and arithmetic performance when the effects of working memory and non-verbal intelligence are controlled.

In this thesis, we were also interested in the relation between finger counting and arithmetic performance in 6 years old children. We show that children who use their fingers to solve simple additions are one the ones with the highest working memory capacities. Moreover, these children were followed during 3 years and we show that using the finger counting strategy early and abandoning it quickly during the course of development quickly is the best trajectory for developing good arithmetic skills. Finally, we also showed that children who abandoned their fingers were more likely to have used the sophisticated « Min » strategy during the year preceding the shift to a mental strategy than children who kept using their fingers to calculate. Children who were able to abandon their fingers early corresponded to children with the highest working memory capacities. Theoretical and pedagogical conclusions have been drawn from these observations.



## Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier ma directrice de thèse, Catherine Thevenot, Professeure à l'Université de Lausanne, de m'avoir encadré tout au long de cette thèse et qui m'a prodigué de nombreux conseils pour accomplir cette recherche. Cette thèse est le fruit d'une collaboration de plus de trois années avec elle. C'est à ses côtés que j'ai compris ce que rigueur et précision voulaient dire. Ses qualités pédagogiques m'ont permis de bénéficier de ses précieuses connaissances et ses conseils avisés ont fortement contribué à l'avancement de mon travail. Je la remercie chaleureusement pour son soutien et sa bienveillance.

Je remercie Pierre Barrouillet, Professeur à l'Université de Genève, pour son grand intérêt porté à ce travail, sans lequel je n'aurais pas pu développer et mener à bien ce travail de recherche.

Je remercie Pierre Barrouillet, Professeur à l'Université de Genève et Edouard Gentaz, Professeur à l'Université de Genève, qui ont accepté d'être les examinateurs de cette thèse. Leurs judicieux conseils ont contribué à alimenter ma réflexion et à affiner mon propos.

Je remercie Virginie Crollen, Professeure à l'Université Catholique de Louvain, David Sander, Professeur à l'Université de Genève et Michel Fayol, Professeur émérite à l'Université de Clermont-Ferrand, de l'honneur qu'ils m'ont fait en acceptant de faire partie des membres du jury de cette thèse. Je leur exprime toute ma gratitude d'avoir accepté de consacrer du temps à l'examen de ce manuscrit.

Je remercie chaleureusement les nombreuses enseignantes qui m'ont accueilli dans leurs classes tout au long de ces trois années et sans qui cette recherche n'aurait pu être menée à bien. Leur collaboration fut précieuse. Je tiens aussi tout particulièrement à remercier les parents pour la confiance accordée à ce projet. Enfin, un mot tout particulier pour les enfants et leur enthousiasme pendant les moments passés ensemble, qui s'apparentaient plutôt pour eux à des instants d'évasion de leur salle de classe.

Je tiens à remercier tous mes merveilleux collègues, Carotte, Evie, Isabelle, Jonathan, Kim, Naomi, Sébastien et Simon, pour leur disponibilité, leur aide indéfectible et leurs précieux conseils. Leur joie de vivre et leurs encouragements ont été pour moi un phare tout au long de cette aventure.



A mes amis, qui même à distance m'ont apporté leur soutien. Je les en remercie sincèrement.

Enfin, un immense merci à ma famille. Maman, Papa, je vous remercie du fond du cœur pour vos encouragements tout au long de ces trois années et pour votre soutien. Merci à ma sœur, Léa, qui m'a tout simplement rassurée, comme elle a toujours su le faire et qui m'a fourni la motivation nécessaire pour mener ce travail à son terme.

Sans oublier la plus belle personne de ma vie ... Julien. Je lui exprime ici ma profonde reconnaissance pour son écoute bienveillante et sa force dans les moments difficiles de la rédaction. Sa présence est pour moi le socle solide sur lequel j'ai toujours pu m'appuyer. Il a su apaiser mes angoisses et me transmettre l'énergie nécessaire pour l'aboutissement de ce projet.



## Table des matières

Objectifs généraux .....	1
Introduction .....	5
<b>Partie 1 : Partie théorique</b> .....	<b>9</b>
I. Gnosie digitale et performances arithmétiques.....	11
II. Le comptage sur les doigts comme médiateur de la relation entre gnosie digitale et performances arithmétiques .....	15
III. Synthèse de la problématique .....	23
<b>Partie 2 : Partie empirique</b> .....	<b>27</b>
I. Eléments de méthodologie.....	29
1. Participants.....	29
2. Procédure et matériel .....	30
2.1. Evaluation des compétences en arithmétique .....	31
2.2. Evaluation des habiletés manuelles .....	32
2.3. Evaluation des capacités cognitives générales .....	33
2.4. Evaluation des capacités de dénombrement .....	34
2.5. Evaluation des capacités de comptage verbal.....	34
2.6. Evaluation des capacités de lecture .....	34
II. Résultats.....	35
Analyse des résultats chez les enfants de 2P (6 ans).....	35
1. Le lien entre gnosie digitale et performances arithmétiques.....	35
2. Hypothèse de médiation.....	36
3. Caractéristiques cognitives générales des enfants et comptage sur les doigts dans la tâche d'additions simples.....	36
4. Utilisation des doigts pour calculer et performances arithmétiques .....	40
a) Utilisation des doigts et performances arithmétiques sur toutes les additions .....	40



b) Utilisation des doigts et performances arithmétiques par opération .....	42
5. Utilisation des doigts pour calculer et performances dans la tâche de comptage verbal et dans la tâche de dénombrement.....	44
6. Type de stratégies et capacités en mémoire de travail .....	44
7. Discussion .....	48
Analyse longitudinale sur les trois années (6 à 8 ans) .....	51
1. Evolution du lien entre gnosie digitale et performances arithmétiques .....	51
2. Evolution du lien entre capacités en mémoire de travail et performances arithmétiques..	51
3. Evolution du lien entre utilisation des doigts pour calculer et performances arithmétiques	52
a) Analyse corrélacionnelle.....	52
b) Analyse de la variance.....	53
c) Etablissement des profils.....	54
d) Evolution de l'utilisation des doigts pour calculer et des performances arithmétiques en première et deuxième année .....	58
e) Effet de l'utilisation des doigts pour calculer en première année sur les performances arithmétiques en dernière année .....	59
f) Analyse descriptive des trajectoires développementales.....	60
4. Evolution des stratégies .....	61
5. Discussion .....	63
<b>Partie 3 : Discussion générale</b> .....	<b>67</b>
Références bibliographiques .....	85



## Objectifs généraux

Dans le domaine de la cognition numérique, l'hypothèse de la "cognition manumérique" suppose que l'utilisation des doigts pendant l'enfance pour la représentation et la manipulation des nombres façonne notre compréhension des systèmes numériques (Fischer & Brugger, 2011). Il est vrai que les doigts sont un outil privilégié pour représenter les nombres et la main a été considérée comme la "machine à compter" la plus simple et la plus naturelle qui soit pour l'homme (Ifrah, 1994). Ainsi, parce qu'ils constituent des aides externes pour représenter les nombres, parce qu'ils aident à garder trace des mots-nombres pendant le dénombrement et qu'ils aident à la réalisation d'opérations arithmétiques basiques, les doigts sont généralement vus comme jouant un rôle fonctionnel dans le développement des habiletés numériques (Fayol & Seron, 2005). En effet, comme il sera développé plus tard, Fayol, Barrouillet et Marinthe (1998) ont observé une surprenante relation entre les compétences en arithmétique et les performances en gnosie digitale chez des enfants de 5 à 6 ans et ont conclu à un lien fonctionnel entre doigts et nombres. La gnosie digitale peut être définie comme la capacité d'identifier et de différencier les doigts de la main après une stimulation tactile (Benton, 1955). Ce résultat a été par la suite répliqué plusieurs fois au sein de populations saines (Noël, 2005 ; Gracia-Baffaluy & Noël, 2008) et pathologiques (Thevenot et al., 2014 ; Kinsbourne & Warrington, 1963). Certaines recherches et notamment celle de Newman (2016) ont néanmoins conduit à nuancer cette conception initiale. En effet, Newman (2016) a montré que la corrélation entre gnosie digitale et performances en arithmétique existe seulement chez les enfants plus âgés, c'est-à-dire de 9 à 12 ans mais pas chez les jeunes enfants âgés de 5 à 6 ans. L'auteure a également montré que les performances de ces jeunes enfants dans une tâche d'additions simples ne sont pas prédites pas la gnosie digitale mais par des habiletés cognitives plus générales comme la mémoire à court terme. Selon cette auteure, cette absence de lien entre gnosie digitale et performances arithmétiques s'expliquerait par des capacités arithmétiques et une sensibilité digitale encore en formation chez ces plus jeunes enfants. Cette interprétation est cependant sujette à critique puisque, comme décrit ci-dessus, une corrélation entre gnosie digitale et performances arithmétiques a plusieurs fois été mise en évidence chez des enfants de 5 à 6 ans. Ces résultats contradictoires se révéleront ultérieurement au travers d'une revue de la littérature entre gnosie digitale et performances arithmétiques.

De manière générale, une forte relation entre représentations digitales et habiletés arithmétiques est donc bien documentée dans la littérature. Toutefois, peu d'études ont abordé la question des raisons qui seraient susceptibles d'expliquer cette étrange relation. Certains

chercheurs ont suggéré que le comptage sur les doigts pourrait constituer un facteur explicatif de ce lien (Andres, Di Luca & Pesenti, 2008). L'idée serait ici que plus les gnosies digitales sont développées, mieux l'enfant pourrait représenter les nombres sur ses doigts et par conséquent, plus les quantités pourraient être facilement manipulées sur les doigts pour effectuer des calculs simples. En fait, selon Penner-Wilger et al. (2009), ce lien serait facilité par le fait que les enfants puissent "voir sensoriellement" leurs doigts afin de bien les utiliser dans une activité de comptage. Ainsi, les travaux empiriques et théoriques de chercheurs spécialisés dans la cognition numérique ont fait émerger l'explication d'un lien fonctionnel entre gnosie digitale et habiletés arithmétiques, médiatisé par le comptage sur les doigts (Penner-Wilger et al., 2009 ; Reeve & Humberstone, 2011). C'est cette position que nous défendrons tout au long de ce travail (cf. figure 1). Nous chercherons tout d'abord à confirmer, à partir des données récoltées lors de la première année de recherche, l'existence du lien entre gnosie digitale et performances arithmétiques chez les jeunes enfants âgés de 5 à 6 ans en s'assurant que ce lien ne soit pas dû à un facteur d'efficacité cognitive générale comme la mémoire de travail ou l'intelligence. En nous appuyant sur les travaux de Fayol et al. (1998) et de Noël (2005), notre première hypothèse est qu'il existe un lien entre la gnosie digitale et les performances arithmétiques même lorsque l'efficacité générale est considérée dans la relation (Costa et al., 2011). Ensuite, nous chercherons à éprouver l'hypothèse de l'explication du lien entre gnosie digitale et habiletés arithmétiques par la médiatisation du comptage sur les doigts. En suivant les travaux de Penner-Wilger et al. (2009), nous suggérons que les enfants avec de meilleures gnosies digitales mettent en place le plus précocement et efficacement des stratégies de comptage sur les doigts et par conséquent, que le comptage sur les doigts va permettre à ces mêmes enfants de développer de meilleures compétences en arithmétique. Pour ce faire, notre recherche longitudinale a été menée sur trois ans et a débuté auprès d'enfants âgés en moyenne de 6 ans. Une tâche de gnosie digitale, une tâche de résolution d'additions simples, une tâche de mémoire de travail et un test d'intelligence, celui des Matrices Progressives de Raven Couleur (Raven, Raven & Court, 2003) ont été administrés à chaque enfant. Pour évaluer l'implication du comptage sur les doigts dans la relation entre gnosie digitale et performances arithmétiques, nous sommes principalement intéressés à la résolution d'additions simples pour laquelle l'évolution des procédures de comptage avec les doigts a été précisément documentée (Baroody, 1987 ; Siegler & Shrager, 1984). Dans notre problématique, le comptage sur les doigts est central pour l'explication du lien entre gnosie et performances arithmétiques et c'est la raison pour laquelle une partie de ce travail de thèse sera focalisée sur cette habileté (cf. figure 1).

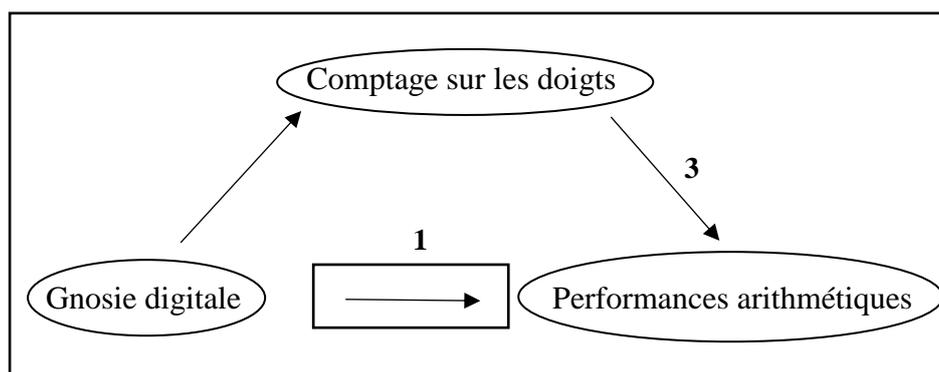


Figure 1 : Relations hypothétiques entre nos trois variables.

La relation entre comptage sur les doigts et habiletés arithmétiques a déjà été documentée par quelques travaux en psychologie développementale et notamment par ceux de Jordan, Kaplan, Ramineni et Locuniak (2008). Comme nous le développerons plus tard, ces auteurs ont montré l'existence d'une relation positive entre fréquence d'utilisation des doigts pour calculer et performances arithmétiques. Toutefois, cette relation évolue au cours du temps. En effet, elle est forte et positive en grande section de maternelle pour devenir significativement négative en deuxième année de primaire. De ces résultats intéressants émergent plusieurs questions concernant le comportement de ces enfants qui calculent avec leurs doigts et qui, à notre connaissance, n'ont pas encore été abordées dans la littérature.

Premièrement, à partir des données récoltées lors de la première année d'étude, nous voulons déterminer les caractéristiques cognitives des enfants âgés de 5 à 6 ans qui calculent avec leurs doigts. Les enfants avec une faible mémoire de travail pourraient avoir besoin de recourir à leurs doigts afin d'alléger la charge mémorielle inhérente à l'accomplissant du calcul (Crollen & Noël, 2015). Nous avons évalué les capacités en mémoire de travail des enfants à travers la tâche du Digit span (Wechsler, 1939). Cependant, à l'inverse, la stratégie de comptage sur les doigts pourrait être difficile à mettre en place par des enfants dont l'efficacité cognitive est limitée et, en ce cas, les enfants présentant les plus fortes ressources en mémoire de travail pourraient correspondre aux enfants qui mettent en place la stratégie le plus précocement et efficacement (Halford, 1993). Dans cette perspective, les capacités en mémoire de travail ne sont plus étudiées vraiment pour elles-mêmes mais plutôt comme une mesure indirecte de l'efficacité cognitive générale. C'est la raison pour laquelle, dans le cas où cette deuxième hypothèse serait validée, nous devrions ajouter une mesure plus directe pour évaluer l'intelligence générale, à savoir les Matrices Progressives de Raven Couleur (Raven et al., 2003). Afin de tester ces hypothèses, nous avons évalué les capacités en mémoire de travail et les capacités d'intelligence non verbale des

jeunes enfants ainsi que leurs performances dans la tâche d'additions simples et leurs fréquences d'utilisation des doigts pour calculer. De plus, les données de la littérature montrent qu'au début de l'apprentissage, les enfants utilisent préférentiellement la stratégie "All". Elle consiste à tout compter sur les doigts c'est-à-dire que les doigts sont levés un à un pour représenter chacun des opérandes à additionner, et une fois les deux collections représentées, tous les doigts sont recomptés séquentiellement pour parvenir au résultat. Cette stratégie est considérée comme la stratégie la plus rudimentaire et la moins efficace. Ensuite, elle est simplifiée et remplacée par des stratégies plus sophistiquées et efficaces, comme la stratégie "Min" qui consiste à compter à partir du plus grand de deux opérandes (Baroody, 1987 ; Siegler & Shrager, 1984). Dans ce travail de recherche, nous déterminerons alors si le choix de stratégies plus ou moins matures est lié aux capacités en mémoire de travail des enfants. Pour cela, nous avons établi les stratégies des enfants de 6 ans qui calculent sur leurs doigts et nous les avons mises en lien avec leurs capacités en mémoire de travail.

Deuxièmement, à partir des données récoltées sur les trois années de recherche et dans une démarche de recherche longitudinale, nous voulons déterminer l'évolution de l'utilisation des doigts pour calculer et des performances dans une tâche de calcul. Pour ce faire, nous avons considéré un groupe d'enfants de 6 ans qui calcule à l'aide des doigts et un groupe d'enfants du même âge qui n'utilise pas ses doigts dans les calculs, et nous avons suivi leur évolution tant au niveau de l'utilisation des doigts pour calculer que des performances à la tâche de calcul sur trois années consécutives. Les profils des enfants concernant leurs capacités en mémoire de travail, leur intelligence générale et le type de stratégie de calcul sur les doigts qu'ils utilisent ont également été dégagés tout au long des trois années étudiées. L'évolution des stratégies de comptage sur les doigts a particulièrement retenu notre attention. Comme mentionné précédemment, les enfants utiliseraient d'abord des stratégies rudimentaires et coûteuses en temps puis ces stratégies seraient remplacées par des stratégies plus sophistiquées et efficaces (Baroody, 1987). Selon Baroody (1987), c'est la pratique qui permettrait aux enfants d'utiliser des stratégies de plus en plus évoluées et à terme de pouvoir s'affranchir de leurs doigts pour calculer et de procéder aux calculs de manière purement mentale. D'après cette observation, nous suggérons que les enfants qui calculent sur leurs doigts précocement utilisent plus rapidement des stratégies sophistiquées et donc s'extrait plus rapidement du comptage sur les doigts que les enfants qui ont mis en place la stratégie de comptage sur les doigts plus tardivement.

## Introduction

Au minimum depuis l'Antiquité et dans la majorité des cultures, les enfants mais aussi les adultes ont recours à leurs doigts pour compter (Ifrah, 1994). En fait, Butterworth (1999a) mentionne que dans la plupart des cultures humaines qui connaissent l'usage des nombres et au sein desquelles il existe des procédures de comptage les enfants utilisent leurs doigts pour compter avant même que l'arithmétique ne leur soit explicitement enseignée. Poeck (1964) suggère même que l'activité de comptage sur les doigts est ancrée biologiquement. Il rapporte en effet un cas surprenant d'une petite fille de 11 ans, née sans avant-bras, mais qui comptait quand même sur ses mains fantômes pour résoudre des calculs simples. Si les enfants utilisent leurs doigts pour compter, ils s'en servent également pour résoudre des additions simples et parfois pour des calculs plus complexes (Bender & Beller, 2012). Dans ce type de situation, les doigts constituent pour les enfants une aide externe privilégiée pour représenter les nombres et les manipuler concrètement. En effet, il est vrai que les doigts constituent une forme de "calculatrice naturelle" et sont toujours à disposition. Les données anthropologiques considèrent que notre système actuel de numération en base 10 fait référence à nos dix doigts (Ifrah, 1981). Si la base dix est actuellement la plus répandue dans les différentes cultures, d'autres bases existent et attestent aussi du rôle des doigts dans les représentations numériques. Il s'agit de la base cinq et de la base vingt par exemple. Plus précisément, la base cinq trouverait son origine dans le fait que certains peuples avaient pris l'habitude de ne compter que sur une seule main. Cette technique est notamment employée dans les régions d'Afrique et d'Océanie. Le comptage se fait de un à cinq avec la main gauche, puis le nombre cinq est retenu en levant le pouce de la main droite. Dès que cinq nouveaux doigts sont levés sur la main gauche, un deuxième doigt de la main droite est levé. Ainsi, lorsque l'index est levé, cela signifie que l'on a compté jusqu'à dix, jusqu'à quinze avec le majeur, vingt avec l'annulaire et vingt-cinq avec l'auriculaire. Cette technique permet donc de compter jusqu'à 30 :  $5 \times 5 + 5 = 30$ . Quant à la base 20, elle trouverait son origine dans le fait que certains peuples, comme les Mayas, les Celtes et les Aztèques, se sont rendus compte qu'ils pouvaient utiliser les dix doigts de leurs mains mais aussi leurs dix orteils pour compter (Ifrah, 1981).

Cet usage des doigts pour traiter les nombres, le comptage et les calculs a interpellé les chercheurs spécialistes dans la cognition numérique et certains se sont demandé si la liaison entre les doigts et les nombres n'était pas inscrite dans certaines aires cérébrales. Les études en imagerie cérébrale ont tout d'abord montré que les représentations mentales des doigts reposent sur les mêmes substrats anatomiques que les traitements numériques. En effet, au début du siècle passé, le neurologue Joseph Gerstmann (1940) avait décrit une série de patients présentant d'étranges

concomitances de symptômes d'agraphie, de confusion spatio-temporelle, d'agnosie digitale et d'acalculie. Ce syndrome, à présent connu sous le nom de Syndrome de Gerstmann a aussi été identifié plus tard chez les enfants (Kinsbourne, Elizabeth & Warrington, 1963). Généralement, la lésion responsable de ce syndrome se trouve localisée dans l'hémisphère gauche au niveau pariétal et plus précisément au niveau du gyrus angulaire. Cette association suggérerait le recouvrement, au moins partiel, des aires cérébrales concernées par la représentation des doigts, de l'espace et des nombres (Hubbard, Piazza, Pinel & Dehaene, 2005). Toutefois, il est utile de réexaminer ce syndrome d'un point de vue critique car d'après certains auteurs, les quatre éléments de ce syndrome ne seraient pas davantage corrélés entre eux qu'avec d'autres troubles neuropsychologiques (Benton, 1961 ; Poeck & Orgass, 1966).

Malgré cette remise en question du syndrome de Gerstmann, les études actuelles en imagerie cérébrale sont venues confirmer l'existence d'un voisinage, voire d'un recouvrement, en montrant que le lobe pariétal et le gyrus gauche précentral sont effectivement impliqués aussi bien dans les activités numériques que dans les gnosies digitales et les mouvements des mains (Di Luca, Grana, Semenza, Seron & Pesenti, 2006 ; Sandrini & Rusconi, 2009). Deux hypothèses prédominantes ont été proposées pour expliquer les origines de ce recouvrement neuro-anatomique. Il s'agit de l'hypothèse fonctionnaliste selon laquelle les interactions entre les doigts et les nombres seraient établies au cours du développement ontogénique. L'enfant découvrirait par lui-même l'utilité des doigts pour réaliser des procédures de comptage ou de calcul (Butterworth, 1999a). Ainsi, la mise en place des compétences arithmétiques purement symboliques serait permise grâce à l'utilisation des doigts lors de la manipulation des nombres. Selon la deuxième hypothèse, celle du redéploiement massif, les interactions entre les doigts et les nombres émergeraient au cours du développement phylogénétique (Anderson, 2010 ; Penner-Wilger & Anderson, 2008 ; 2013). Plus précisément, les circuits neuronaux, initialement dédiés à la représentation des doigts, seraient réutilisés pour le traitement des nombres justement parce que, au cours de la phylogenèse, la représentation digitale possédait des propriétés fonctionnelles appropriées pour développer le concept du nombre.

Plusieurs auteurs ont donc suggéré un rôle essentiel des doigts dans la cognition numérique au point de considérer que le rapport entre les doigts et les nombres serait inscrit dans l'histoire biologique de l'espèce humaine. Selon cette perspective, il y aurait une relation fonctionnelle entre la représentation des doigts et le développement de l'arithmétique (Butterworth, 1999a). Selon Brian Butterworth (1999a), le dispositif inné dont nous disposerions pour traiter les nombres se trouverait dans le lobe pariétal gauche. Ce dispositif ne permettrait que le traitement précis des

petites quantités, c'est-à-dire jusqu'à 4. Au-delà de cette frontière, le passage à l'arithmétique serait alors lié à l'usage universel des doigts.

Dans ce travail de thèse, les travaux expérimentaux mettant en évidence une relation fonctionnelle entre doigts et nombres seront tout d'abord présentés à travers une revue de la littérature entre gnose digitale et performances arithmétiques. Cette partie fait référence au numéro 1 de la figure 1 représentée ci-dessus. Ensuite, nous présenterons l'hypothèse selon laquelle le comptage sur les doigts constitue un facteur explicatif de cette relation. Cette partie est représentée par le numéro 2 de la figure 1. Notre approche consiste à présenter les travaux qui permettent directement ou indirectement d'éclairer la nature de cette relation et non pas de faire une revue exhaustive des recherches mettant en lien les doigts et les nombres. Ainsi, par exemple les nombreux travaux s'intéressant aux rapports entre espace, directionnalité du comptage sur les doigts et compétences numériques ne seront pas évoqués ici. En revanche, nous nous focaliserons sur le lien entre le comptage sur les doigts et les performances arithmétiques.

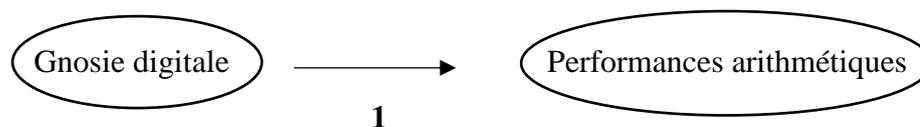


# Partie 1

## **Partie théorique**



## I. Gnosie digitale et performances arithmétiques



Une relation entre la gnosie digitale et les habiletés arithmétiques est documentée dans la littérature. Il est actuellement difficile de trouver une définition exhaustive et précise de la gnosie digitale. Certains auteurs la définissent comme la capacité de représentation mentale des doigts de la main d'un individu et de son habileté à les différencier après une stimulation tactile (Benton, 1977 ; Lezak, Howieson & Loring, 2004). D'autres la définissent comme un processus plus complexe qui nécessite la mobilisation par l'individu de plusieurs informations sensorielles. En fait, les individus doivent être capables de capter la stimulation tactile, de définir sa position et dans le cas où plusieurs doigts sont touchés, ils doivent être capables de discerner les différentes stimulations. Ce n'est qu'une fois que ces informations ont été déterminées qu'ils pourront localiser le ou les doigts stimulés (Trotter & Davis, 2011). Dans ce travail de thèse, nous la définirons comme dans la majorité des études antérieures, c'est-à-dire comme la capacité à distinguer, nommer ou reconnaître les doigts de la main après une stimulation tactile sans contrôle visuel (Fayol et al., 1998; Marinthe, Fayol & Barrouillet, 2001 ; Gracia-Baffaluy & Noël, 2008). Comme mentionné précédemment, une des principales études ayant mis en évidence cette surprenante relation est celle menée par Fayol et ses collègues (1998). Dans un travail princeps adoptant une approche longitudinale, ces auteurs ont étudié 300 enfants âgés entre 5 et 6 ans, à deux reprises et à huit mois d'intervalle. Ces enfants étaient examinés au moyen de différentes tâches neuropsychologiques, incluant une tâche motrice, une tâche psychomotrice et une tâche de gnosie digitale. Les gnosies digitales étaient mesurées via la capacité de l'enfant à reconnaître à l'aveugle et à identifier une séquence de doigts qui avaient subi une légère pression de la part de l'expérimentateur. Les enfants étaient également soumis à deux tests classiques mesurant le niveau intellectuel, à savoir le test du dessin du losange et le test du dessin du bonhomme de Goodenough (Goodenough, 1926). Huit mois plus tard, ces mêmes enfants ont été soumis à ces mêmes tests neuropsychologiques, mais aussi à différents tests arithmétiques incluant une dictée de nombres et une tâche de résolution de problèmes arithmétiques avec un ou deux opérandes, comme par exemple " $? + 7 = 14$ ". Le résultat principal obtenu dans cette étude montre un pouvoir prédictif des scores obtenus dans la tâche de gnosie digitale supérieur à celui des tests d'intelligence sur le niveau des performances numériques mesuré huit mois plus tard. Cette supériorité du pouvoir

prédictif s'applique essentiellement sur la résolution des additions simples, la réussite aux deux autres tâches étant mieux prédite par le niveau de développement intellectuel. Trois ans plus tard, Marinthe et al. (2001) ont poursuivi cette étude auprès des mêmes enfants, âgés désormais de 8 ans. A nouveau, ces auteurs montrent le pouvoir prédictif des compétences perceptivo-tactiles sur les habiletés arithmétiques ultérieures. De manière intéressante, ces auteurs montrent également que les tests neuropsychologiques ne prédisent pas les niveaux d'efficiences atteints en lecture et en écriture de nombres, renforçant ainsi la spécificité des effets observés. Noël (2005) a réalisé une étude longitudinale similaire à celle de Fayol et al. (1998) afin de vérifier le lien entre les gnosies digitales et les habiletés numériques, en apportant toutefois quelques modifications. Son étude commence avec des enfants âgés en moyenne de 6 ans et 8 mois et le délai entre les évaluations est de 15 mois. Elle a également intégré une tâche mesurant les habiletés de lecture ainsi que des tests évaluant la vitesse de traitement, la préférence manuelle et l'orientation gauche-droite. La tâche de gnosie digitale a été naturellement conservée. Les résultats montrent à nouveau un rapport entre les scores obtenus par les enfants à la tâche de gnosie digitale lors du premier testing et le niveau de performances aux tâches numériques évalué 15 mois plus tard. Le niveau de gnosie digitale n'est là encore pas non plus prédictif des habiletés en lecture. Toutefois, l'orientation gauche-droite est également corrélée à la performance en mathématiques et les gnosies digitales prédisent de la même manière l'ensemble des activités numériques. D'autres chercheurs ont par la suite confirmé le lien entre gnosie digitale et performances en mathématiques. Costa et al. (2011) par exemple, ont étudié des enfants âgés entre 8 et 11 ans et ont montré que les performances à des tâches de gnosie digitale sont moins bonnes chez les enfants présentant des difficultés en mathématiques que chez les enfants sans difficulté. Des investigations plus précises ont même montré que les enfants de 6 ans avec une bonne gnosie digitale présentent peu d'effet de distance et sont plus précis dans des tâches de comparaison symbolique de nombres que les enfants présentant une moins bonne gnosie (Penner-Wilger et al., 2009). En d'autres termes, plus la différence entre les quantités était faible et plus les enfants avec une faible gnosie commettaient des erreurs par rapport aux enfants avec une bonne gnosie. D'après ces résultats, il semblerait donc que les enfants performants dans des tâches de gnosie digitale présentent des représentations mentales des nombres sur les doigts plus claires et plus exactes que les enfants avec une faible gnosie digitale. Le rôle de la gnosie digitale dans la construction des savoirs numériques a également été mis en évidence à travers l'étude de populations atypiques. En effet, Kinsbourne et Warrington (1963) ont décrit sept enfants âgés entre 9 et 15 ans nés avec une agnosie digitale. Tous ces enfants présentaient de grandes difficultés à se représenter la plupart des concepts numériques et plus particulièrement, ils avaient beaucoup de mal à résoudre des additions ou des

soustractions simples. Une mauvaise utilisation des doigts pour calculer, due à un déficit en gnosie digitale, aurait donc un impact négatif sur les performances en arithmétique des enfants.

Pour aller plus loin dans l'explication du lien entre gnosie digitale et performances arithmétiques, Gracia-Baffaluy et Noël (2008) ont suggéré que s'il existe une relation fonctionnelle entre ces deux habiletés, alors un entraînement visant une meilleure reconnaissance et une meilleure discrimination digitale devrait avoir un impact positif sur les performances numériques. C'est dans cette perspective qu'elles ont présenté ce type d'entraînement à 33 enfants de 6 ans ayant de faibles gnosies digitales et à 14 enfants présentant de bonnes performances en gnosie digitale. Après huit semaines d'entraînement, ces auteurs révèlent une corrélation significative et positive entre les scores obtenus à la tâche de gnosie digitale après l'entraînement et les performances mathématiques. Plus précisément, le groupe expérimental a obtenu de meilleures performances au test évaluant les gnosies digitales et à certaines épreuves mathématiques, comme la tâche de représentation de quantités à l'aide des doigts, pour lesquelles il ne s'était pourtant pas entraîné. Les auteurs constatent également un effet bénéfique de cet entraînement sur la représentation interne des doigts de la main, évaluée par un dessin de la main réalisé par l'enfant, alors que le dessin du bonhomme, réalisé avant et après entraînement, n'a pas évolué significativement. A partir de cette observation, ces auteurs ont suggéré un lien causal entre gnosie digitale et compétences mathématiques. Or, ce résultat est à considérer avec précaution car il a été remis en cause par Fischer (2010) qui mentionne que d'éventuels phénomènes de régression vers la moyenne pourraient expliquer ce qui avait tout d'abord été interprété comme des progrès chez le groupe entraîné.

Enfin, les études en imagerie cérébrale supportent également le lien entre gnosie digitale et capacités numériques en mettant en évidence les mêmes substrats anatomiques, plus précisément le lobe pariétal et le gyrus angulaire précentral pour les traitements numériques et les représentations mentales des doigts (Di Luca et al., 2006; Sandrini & Rusconi, 2009). A l'appui de ces observations anatomiques, il a été montré que la stimulation du lobe pariétal supérieur chez une personne saine perturbe non seulement sa capacité à se représenter mentalement ses doigts mais aussi sa capacité de jugement numérique (Rusconi, Walsh & Butterworth, 2005). A l'inverse, des activations du lobe pariétal spécialisé dans les représentations des doigts ont été mises en évidence chez l'adulte lors de la réalisation de calculs arithmétiques simples (Zago et al., 2001). De manière intéressante et comme mentionné précédemment, la proximité des aires cérébrales du traitement du nombre et des doigts avait déjà été soupçonnée par Gertsmann (1940) qui avait décrit une série de patients présentant, entre autres symptômes, une association troublante entre agnosie et acalculie. L'explication anatomico-cérébrale de cette comorbidité a depuis lors été confirmée

par les études en imagerie cérébrale (Roux, Boetto, Sacko, Chollet & Tremoulet, 2003). Pour résumer, l'ensemble de ces données établit donc une forte relation entre gnosie digitale et compétences en arithmétique.

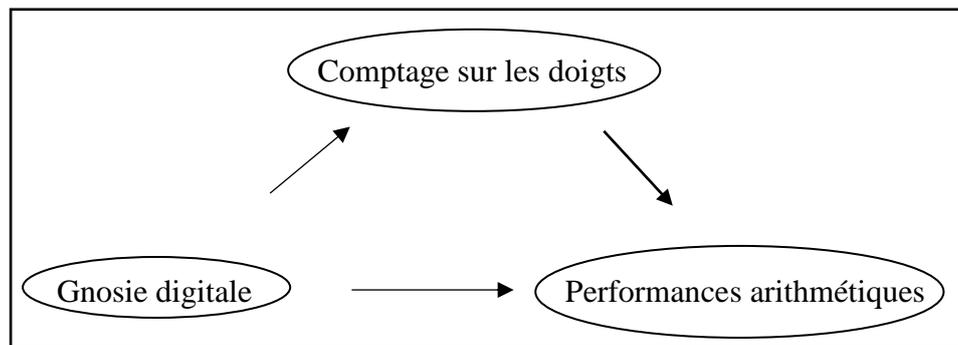
Toutefois, certaines recherches ont conduit à nuancer cette conception initiale. En effet, les associations entre faiblesse des gnosies digitales et faiblesse des performances arithmétiques n'ont été que partiellement confirmées, notamment chez les enfants présentant des troubles moteurs. En fait, Thevenot et al. (2014) ont montré que des troubles moteurs affectant les gnosies digitales ne conduisent pas systématiquement à des troubles en arithmétique. Plus précisément, les enfants présentant une gnosie digitale défectueuse présentaient le même niveau de performance en arithmétique que des enfants de même âge et de même niveau intellectuel, et ne présentant aucun trouble de la gnosie digitale. Plus récemment, les résultats de Newman (2016) sont également venus questionner l'existence de la véritable relation entre gnosie digitale et performances en mathématiques. En effet, dans son étude menée sur 76 enfants âgés entre 5 et 12 ans, elle a montré que la corrélation entre gnosie digitale et performances en arithmétique existe seulement chez les enfants plus âgés, c'est-à-dire entre 9 et 12 ans mais pas chez les enfants de 5 à 8 ans. De plus, chez les jeunes enfants, l'auteure a également montré que leurs performances dans une tâche d'additions simples ne sont pas prédites par la gnosie digitale mais par des habiletés cognitives générales, notamment les capacités langagières et la mémoire à court terme. Ainsi, ces résultats suggèrent que la gnosie digitale contribue aux performances en arithmétique mais que cet impact varie en fonction de l'âge. L'auteure explique cette absence de lien par des capacités arithmétiques et une sensibilité digitale encore en formation chez ces plus jeunes enfants. Cette interprétation peut cependant être interrogée en référence aux études révélant une corrélation entre gnosie digitale et performances numériques chez les enfants âgés de 5 à 8 ans (Fayol et al., 1998 ; Marinthe et al., 2001 ; Noël, 2005). Enfin, dans leur recherche menée sur 197 enfants âgés en moyenne de 7 ans, Long et al. (2016) ont montré que le lien entre la gnosie digitale et les performances dans une tâche d'additions simples diminuait fortement une fois la variable de l'âge contrôlée, et que les capacités de dénombrement et les capacités de comparaison de nombres symboliques étaient les meilleurs prédicteurs des habiletés arithmétiques. Selon ces auteurs, la gnosie digitale ne prédirait donc pas de manière fiable le développement des habiletés arithmétiques.

En résumé, la plupart des données rapportées ci-dessus mettent en évidence l'existence de relations entre les performances à des épreuves de gnosie digitale et les résultats à des tâches arithmétiques. Les résultats de certaines études récentes ont cependant conduit à nuancer cette conception initiale. Quoiqu'il en soit, peu d'études ont abordé la question des raisons susceptibles

d'expliquer la relation entre gnosie digitale et performances arithmétiques et, actuellement, la question de la nature exacte de cette surprenante relation reste encore à élucider. Pour expliquer la nature de cette relation, certains chercheurs ont suggéré que le comptage sur les doigts pourrait constituer le facteur explicatif de cette relation (Andres et al., 2008). Dans la partie qui suit, nous allons donc présenter les travaux qui permettent directement ou indirectement d'éclairer la nature de cette proposition.

## II. Le comptage sur les doigts comme médiateur de la relation entre gnosie digitale et performances arithmétiques

2



Comme évoqué précédemment, certains chercheurs ont suggéré que le comptage sur les doigts pourrait constituer le facteur explicatif de la relation entre gnosie digitale et performances arithmétiques (Andres et al., 2008). Un des moyens pour mieux comprendre cette proposition est de répertorier les activités numériques pour lesquelles il y a une implication des doigts de manière plus ou moins précoce au cours du développement. Les doigts peuvent tout d'abord constituer des aides externes pour représenter les nombres (e.g., lever trois doigts pour représenter la quantité 3), mais aussi aider à garder trace des mots-nombres pendant le dénombrement (e.g., lorsque le nombre de lettres séparant B et K doit être déterminé). Ils peuvent également soutenir la compréhension du système en base 10 ainsi que la réalisation d'opérations arithmétiques (Fayol & Seron, 2005). Parmi ces activités, le comptage digital, qui regroupe la représentation des mots-nombres sur les doigts en vue de dénombrement et la réalisation de calcul à l'aide des doigts, pourrait constituer un très bon candidat pour rendre compte de la relation entre gnosie digitale et

compétences mathématiques. En fait, Penner-Wilger et al. (2009) qui, comme dans les études précédemment citées, observent une relation entre gnosie digitale et performances arithmétiques, suggèrent que les enfants avec les meilleures gnosies digitales seraient plus enclins et plus aptes à utiliser leurs doigts pour compter. L'idée serait ici que plus les enfants disposent de bonnes représentations de leurs doigts, plus ils seraient aptes à compter sur leurs doigts pour résoudre des problèmes arithmétiques. En retour, le comptage sur les doigts faciliterait le développement des habiletés arithmétiques. En effet, pour Penner-Wilger et al. (2009), ce lien serait facilité par le fait que les enfants puissent "voir sensoriellement" leurs doigts afin de bien les utiliser dans une activité de comptage. Cette interprétation est confortée par l'étude de Reeve et Humberstone (2011) qui ont non seulement montré que les performances en gnosie digitale changeaient lors des premières années de scolarité, mais que ces changements étaient associés à l'utilisation des doigts dans des tâches arithmétiques pour faciliter les calculs. De notre point de vue, cette interprétation est soutenue par des évidences en imagerie cérébrale montrant, chez des enfants de 8 à 13 ans, une activation du cortex somatosensoriel et des zones cérébrales spécialisées dans la motricité digitale pour la résolution de soustractions (Berteletti & Booth, 2015). De manière intéressante, ce résultat n'était pas observé pour les multiplications dont l'enseignement est plutôt basé sur un apprentissage par cœur que sur des procédures de comptage pouvant impliquer les doigts. En lien avec ce travail de thèse, il serait donc effectivement plausible qu'une meilleure gnosie permette une représentation plus directe et précise des nombres sur les doigts, puisque pour reprendre l'expression de Penner-Wilger et al. (2007), les enfants seraient plus enclins à voir "sensoriellement leurs doigts" pour compter. Cette efficacité rendrait alors plus fréquente la mise en œuvre du comptage sur les doigts et les tâches de calculs simples seraient plus facilement effectuées.

La pertinence de l'hypothèse selon laquelle la relation entre gnosie digitale et performances arithmétiques est médiatisée par le comptage sur les doigts ne prend toutefois de sens que s'il existe une relation entre le comptage sur les doigts et les performances arithmétiques, ou du moins numériques. Lafay, Thevenot, Castel et Fayol (2013) ont montré que les enfants qui utilisent le plus leurs doigts dans des tâches de comptage sont aussi les enfants qui affichent les meilleures performances dans une tâche de dénombrement. Selon la proposition théorique d'Andres et al. (2008), l'usage des doigts pour le comptage constituerait le chaînon manquant pour que l'enfant puisse appréhender la structure des nombres naturels à partir de son interaction avec le monde physique. Plus spécifiquement, le comptage sur les doigts permettrait la maîtrise des principes fondamentaux pour le développement des capacités de dénombrement tels que décrits par Gelman et Gallistel (1978). Les principes sous-jacents au dénombrement sont au nombre de cinq. Il s'agit

du principe de correspondance terme à terme, du principe de l'ordre stable, du principe de cardinalité, du principe d'abstraction et du principe de non-pertinence de l'ordre. Selon la proposition d'Andres et al. (2008), le principe d'ordre stable, selon lequel le dénombrement ne peut se faire qu'à partir d'une suite d'étiquettes verbales suivant une séquence fixe, pourrait alors se construire à partir de stratégies de comptage sur les doigts constantes. Par exemple, commencer par le pouce, puis l'index, puis le majeur etc. De même, le principe de correspondance terme à terme, selon lequel chaque unité de la collection à dénombrer correspond à une et une seule étiquette, serait assuré par une représentation digitale des quantités. Comme chaque doigt peut être mis en correspondance terme à terme avec un élément d'une collection, chaque doigt peut être assimilé à une unité et sa manipulation permet de percevoir concrètement les modifications quantitatives. Par exemple, le pouce correspond uniquement à un objet ou à une étiquette, l'index à un autre objet ou à une autre étiquette etc. et le nombre de doigts levés ou abaissés augmente ou diminue selon que les collections et les quantités initiales à traiter s'accroissent ou diminuent. Brissiaud (1991) souligne également l'avantage du comptage sur les doigts en mentionnant que les doigts sont utilisés comme des *collections-témoins*. Il a montré que les jeunes enfants obtiennent de meilleures performances en mathématiques lorsqu'ils utilisent un code analogique de la numérosité, c'est-à-dire leurs doigts, plutôt qu'un codage verbal. Il explique cela par le fait que les collections des doigts permettent à l'enfant de mémoriser les éléments déjà comptés en s'appuyant sur la correspondance terme à terme entre les doigts levés et les objets déjà comptés. D'après la proposition d'Andres et al. (2008) et l'observation de Brissiaud (1991), l'utilisation des doigts pour calculer faciliterait la compréhension et le développement du concept du nombre, notamment ses propriétés cardinales et ordinales et pourrait donc effectivement jouer un rôle dans le développement des performances numériques. Ces propositions peuvent être intégrées dans le grand courant théorique de la cognition incarnée (Barsalou, 1999) selon lequel les représentations mentales sont encore associées aux systèmes sensori-moteurs qui ont gouverné les actions liées aux objets représentés (Wilson, 2002). Dans notre domaine d'intérêt, cette théorie a donné naissance à l'hypothèse de la "cognition manumérique" qui suppose que l'utilisation des doigts pendant l'enfance façonne notre compréhension du système numérique (Fischer & Brugger, 2011). Ainsi, l'ensemble des données présentées ci-dessus montrent une relation entre comptage sur les doigts et activités numériques. Ces acquisitions numériques pourraient être à la base des performances arithmétiques, ce qui étaye la proposition selon laquelle la relation entre gnose digitale et performances arithmétiques est médiatisée par le comptage sur les doigts. Mais la pertinence de cette hypothèse prend encore plus de sens à travers les travaux empiriques montrant une relation directe entre comptage sur les doigts et performances arithmétiques.

En effet, Domahs, Krinzinger et Willmes (2008) ont montré que les premières expériences de comptage sur les doigts auraient encore un rôle sur nos performances arithmétiques à l'âge adulte. Plus précisément, ces auteurs ont montré que les enfants de 7 à 8 ans manifestent un nombre disproportionné d'erreurs distantes de 5 de la bonne réponse lorsqu'ils doivent résoudre mentalement une addition. Ces auteurs expliquent que durant l'enfance, ces erreurs à 5 de la réponse correcte seraient dues à l'oubli de comptabiliser les traces d'une main entière levée lors du comptage. Plus précisément, pour résoudre  $9 + 7$  par exemple, l'enfant lève d'abord 9 doigts et recrute une nouvelle fois ses mains pour compléter les 7 pas manquants. Il se retrouve alors avec 6 doigts levés. L'enfant se souviendrait seulement d'une main pleine utilisée antérieurement et conséquemment, additionnerait 5 doigts aux 6 doigts levés au lieu de 10. Ainsi, la réponse erronée de 11 serait produite au lieu de la bonne réponse, c'est-à-dire 16. Les mêmes effets peuvent également être mis en évidence chez l'adulte. Effectivement, même les adultes experts en mathématiques recourent encore à leurs doigts lorsqu'ils sont confrontés à certaines tâches numériques. C'est le cas notamment dans des activités de dénombrement ou dans des situations de double tâche où les individus doivent par exemple compter le nombre de syllabes d'une phrase tout en lisant à voix haute un texte (Lucidi & Thevenot, 2014). Dans de telles situations, la boucle phonologique étant bloquée, la meilleure stratégie possible à utiliser pour réussir la tâche est celle de compter sur ses doigts. Les adultes se servent aussi de leurs doigts lors de la résolution de certains calculs complexes. Dans ce cas, l'usage des doigts est attesté par le fait que les adultes font, comme les enfants, souvent plus d'erreurs distantes de 5 de la réponse correcte lors d'un calcul mental (Klein, Moeller, Willmes, Nuerk & Domahs, 2011). Par exemple, au lieu de répondre 64 au problème  $47 + 17$ , les individus donneront la réponse erronée de 59. L'adulte aurait donc intériorisé ces comportements sensori-moteurs effectués durant l'enfance et c'est pourquoi il continuerait de produire des erreurs distantes de 5 de la réponse correcte lors de calculs purement mentaux. De plus, une lenteur significative des calculs nécessitant le passage de 5 unités a été observé et atteste d'une utilisation des doigts même pour des calculs simples chez les adultes. Effectivement, ils mettent plus de temps à résoudre  $4 + 3$  que  $5 + 2$  car la première addition nécessite un passage arithmétique au-delà de 5. Cette relation entre comptage sur les doigts et habiletés numériques a également été mise en évidence par Crollen et Noël (2015). En effet, ces auteurs ont montré que des enfants âgés de 5 à 6 ans utilisaient leurs doigts dans des tâches de comptage d'un mot-cible entendu et ce, d'autant plus que la tâche est coûteuse cognitivement. Les auteurs en ont alors conclu que les doigts constituaient un outil procédural aidant au développement de la cognition numérique et permettant l'acquisition des premiers savoirs arithmétiques. Une des principales études montrant le rôle du comptage sur les doigts dans le

développement des habiletés arithmétiques et celle de Jordan et al. (2008). En effet, dans leur étude longitudinale menée sur trois années consécutives, ces auteurs ont étudié les performances dans une tâche d'additions et la fréquence d'utilisation des doigts pour calculer chez 217 enfants américains sans difficultés. Les enfants, âgés de 5 ans et demi la première année, étaient testés individuellement 11 fois, à savoir quatre fois en maternelle, quatre fois en première année de primaire et trois fois en deuxième année de primaire. Ils devaient répondre oralement à des combinaisons numériques de type "Combien font  $n$  et  $m$  ? ". Toutes les stratégies de comptage sur les doigts étaient autorisées à condition que leurs mains restent visibles. Les auteurs ont d'abord observé une corrélation positive entre la fréquence d'utilisation des doigts pour résoudre des additions et les performances arithmétiques chez les enfants de maternelle et première année de primaire et ce, durant les quatre phases d'expérimentation. A partir de 6 ans et demi, cette corrélation décline mais reste positive et significative jusqu'à l'âge de 8 ans. Par contre, dès l'âge de 8 ans et demi, la corrélation devient négative. Ainsi, de 5 à 8 ans, le comptage sur les doigts est une stratégie efficace pour la résolution d'opérations arithmétiques. Par contre et pour la première fois, ces auteurs ont montré qu'à partir de 8 ans et demi, les enfants qui continuent de calculer avec leurs doigts sont moins performants que les enfants qui ne les utilisent pas. Plus précisément, la stratégie de comptage sur les doigts reste sûrement utile pour les enfants qui continuent d'utiliser leurs doigts pour calculer à 8 ans et demi, mais ces enfants sont moins performants par rapport aux enfants ayant abandonné cette stratégie pour résoudre des additions. Ces résultats soutiennent donc l'existence d'un lien entre comptage sur les doigts et performances arithmétiques et apportent une indication sur la période durant laquelle le comptage sur les doigts serait en lien avec de bonnes habiletés arithmétiques. Tous ces travaux mettent ainsi en exergue la relation entre comptage sur les doigts et compétences arithmétiques et permettent de mieux comprendre la relation plus lointaine entre gnose digitale et performances arithmétiques. Toutefois, même s'il s'avérait que le comptage sur les doigts ne constitue en fait pas un élément médiateur de la relation entre gnose digitale et performances en arithmétique, le comptage sur les doigts resterait quand même central pour expliquer la relation entre utilisation des doigts pour calculer et performances en arithmétique. C'est la raison pour laquelle il nous apparaît crucial de l'étudier de manière plus approfondie que ce qui a déjà été fait dans la littérature.

Effectivement, dans ce travail de recherche, nous allons particulièrement nous intéresser au rôle des capacités en mémoire de travail des enfants qui calculent ou non avec leurs doigts. Cette variable de la mémoire de travail nous semble pertinente car les doigts peuvent être utilisés pour alléger la charge en mémoire de travail lors de la résolution de calcul mental (Crollen & Noël, 2015). Ainsi, en raison d'un besoin d'utiliser des aides externes pour effectuer une tâche de calcul,

les enfants présentant peu de ressources en mémoire de travail pourraient être plus enclins à utiliser leurs doigts lors de la résolution d'additions simples que les enfants disposant de plus hautes ressources en mémoire de travail. Cette proposition est confortée par les données de Geary, Brown & Samaranayake (1991) qui ont montré que les enfants âgés de 7 à 11 ans présentant des difficultés en arithmétique utilisaient plus souvent leurs doigts pour calculer et présentaient de plus faibles capacités de mémoire de travail que les enfants sans aucune difficulté mathématique. De même, les recherches menées sur les enfants atteints de dyscalculie développementale ont montré que ce trouble est associé à des capacités en mémoire de travail plus faibles et des stratégies de comptage immatures (Geary, 1993 ; Butterworth, 2010). Plus précisément, les enfants atteints de dyscalculie utilisent plus de stratégies de comptage sur les doigts et des stratégies de résolution moins matures que leurs pairs lors de la résolution d'opérations simples impliquant deux nombres à un seul chiffre comme  $6 + 4$ . Par exemple, ils utilisent majoritairement la stratégie qui consiste à compter chaque élément à additionner puis à tout recompter pour parvenir au résultat quand les autres enfants comptent à partir du premier terme ou du plus grand des deux. Enfin, dans une étude menée chez des enfants âgés en moyenne de 6 ans, Noël, Seron et Trovarelly (2004) ont montré que les capacités en mémoire de travail verbale des enfants prédisent le type de stratégie de calcul utilisée quatre mois plus tard. Plus précisément, les enfants avec une faible mémoire de travail utilisent plus des stratégies de comptage sur les doigts et notamment la stratégie "compter tout" considérée comme support algorithmique immature que les enfants avec de hautes ressources en mémoire de travail. Nous avons montré que les jeunes enfants qui utilisent leurs doigts pour calculer sont aussi les enfants les plus performants dans la tâche de calcul (Jordan et al., 2008). Cette observation mène alors à l'hypothèse contre-intuitive que les enfants avec de plus faibles capacités en mémoire de travail réussissent mieux la tâche de calcul que les enfants avec de plus hautes ressources cognitives. Bien que contre intuitive, cette première hypothèse reste plausible puisqu'il a déjà été montré que les individus présentant de faibles ressources en mémoire de travail, en raison précisément de ce déficit, pouvaient parfois mettre en œuvre des stratégies de calcul plus efficaces que ceux ayant une mémoire de travail plus élevée (Thevenot & Oakhill, 2006). Cependant et inversement, il est possible que la stratégie de comptage sur les doigts soit difficile à mettre en place par des enfants dont l'efficacité cognitive est limitée. En ce cas, une deuxième hypothèse à envisager est que les enfants présentant les plus hautes ressources en mémoire de travail correspondent aux enfants qui mettent en place la stratégie de comptage sur les doigts le plus précocement et efficacement. En effet, comme mentionné précédemment, pour pouvoir élaborer une nouvelle stratégie, les individus doivent mobiliser et articuler tous les concepts pertinents pour réaliser la tâche (Halford, 1993). Dans notre domaine d'intérêt, pour compter sur les doigts, les

enfants doivent mobiliser la connaissance que les nombres peuvent être attribués à des objets, qu'il n'y a qu'un seul objet pour chaque nombre et que les nombres doivent respecter le principe de l'ordre stable selon lequel les mots-nombres sont toujours récités dans le même ordre (Gelman & Gallistel, 1978). Ils doivent aussi considérer leurs doigts comme tout autre ensemble d'objets auquel un nombre peut être attribué. En conséquence, les jeunes enfants présentant de hautes capacités en mémoire de travail seraient plus en mesure de découvrir et de mettre en place la stratégie de comptage sur les doigts que les enfants présentant de faibles capacités en mémoire de travail. Dans ce cas, les capacités en mémoire de travail ne sont plus étudiées vraiment pour elles-mêmes mais plutôt comme une mesure indirecte de l'efficacité cognitive générale. C'est pourquoi, dans le cas où cette deuxième hypothèse serait validée, une mesure plus directe pour évaluer l'intelligence générale, à savoir les Matrices Progressives de Raven Couleur (Raven et al., 2003), devra être ajoutée à ce travail de recherche.

De plus, nous nous sommes posé la question de savoir quelles stratégies de comptage sur les doigts étaient utilisées par ces enfants lors de la résolution d'additions simples et comment ces stratégies de comptage sur les doigts évoluaient au cours du développement. Baroody (1987) a précisément décrit les stratégies de calcul sur les doigts que les jeunes enfants âgés de 4 et 6 ans mettent en place pour résoudre des additions dont la somme ne dépasse pas 10. Nous avons donc voulu déterminer le type de stratégies de comptage sur les doigts utilisées par les enfants lors de la résolution d'additions simples et observer leur évolution. En fait, au début de l'apprentissage, Baroody (1987) remarque que les enfants utilisent préférentiellement une stratégie qui consiste à compter tout. C'est la stratégie la plus rudimentaire, connue sous le nom de stratégie "All". Les doigts sont levés un à un pour représenter chacun des éléments à additionner et une fois que les deux collections sont représentées sur les mains, c'est-à-dire une collection par main, l'enfant procède à un recomptage séquentiel de tous ses doigts levés afin d'arriver au résultat du problème. Par exemple, pour résoudre  $2 + 3$ , l'enfant lève d'abord un doigt puis un deuxième doigt d'une main puis lève 3 doigts de manière séquentielle de l'autre main pour finalement recompter les 2 doigts et les 3 doigts levés sur chacune des mains afin d'arriver au résultat 5. Une fois que l'enfant a réussi à représenter simultanément et non plus séquentiellement les deux opérands, cette stratégie est ensuite modifiée et simplifiée. Elle consiste à représenter directement et simultanément sur les doigts chacun des ensembles à additionner. Comme le mentionnent Siegler et Shrager (1984), cette stratégie se révèle très efficace puisque l'enfant ne va plus compter qu'une seule fois, lorsque tous les doigts représentant chaque opérande seront levés. Ensuite, avec la pratique et l'expérience, les enfants vont être capables de reconnaître rapidement la configuration digitale formée, soit de manière kinesthésique en percevant l'orientation tactile des doigts, soit de

manière visuelle, et pourront produire le résultat sans recourir au comptage. Les autres stratégies décrites par Baroody (1987) sont plus complexes car elles intègrent une composante mentale. En effet, le cardinal de l'une des collections est représenté mentalement et c'est seulement pour la deuxième quantité que le comptage sur les doigts va s'effectuer pour l'additionner à partir de la première. C'est la stratégie dite "comptage à partir du premier " ou stratégie "First" (Groen & Parkman, 1972). Par exemple, pour résoudre  $6 + 3$ , l'enfant va garder en tête 6 et lever 3 doigts séquentiellement en leur associant les étiquettes 7, 8, 9. La stratégie la plus sophistiquée est celle qui consiste non plus à compter à partir du premier opérande mais à partir du plus grand des deux opérandes. C'est la stratégie "Min " pour "Minimum " (Groen & Parkman, 1972). Pour exemple, pour le calcul de  $5 + 7$ , l'enfant part du plus grand de deux nombres, ici 7, et avance de 5 pas dans la chaîne numérique en levant autant de doigts. La mise en place de cette stratégie est plus tardive car elle nécessite une compréhension intuitive du principe de commutativité c'est-à-dire que l'ordre dans lequel sont additionnés les deux nombres ne modifie pas le résultat final. Ainsi, selon Baroody (1987), il y aurait un passage de stratégies externes vers des stratégies internes. Ce passage consiste tout d'abord à utiliser des stratégies où tous les éléments sont représentés sur les doigts, c'est-à-dire la stratégie "All", puis des stratégies où l'un des deux opérandes est représenté mentalement, c'est-à-dire la stratégie "First" et la stratégie "Min", et finalement des stratégies où les deux opérandes sont représentés mentalement, ce qui permet une récupération directe en mémoire du résultat, selon la conception de Siegler et Shrager (1984), ou une automatisation des procédures de comptage selon la conception de Barrouillet et Thevenot (2013). Toutefois, pour d'autres auteurs, le développement des stratégies de comptage sur les doigts ne suivrait pas une trajectoire développementale identique chez tous les jeunes en enfants. En effet, selon Siegler (1996), le choix de la stratégie serait adaptatif dans le sens où les individus tendent à utiliser la stratégie la plus efficace et la moins coûteuse pour un problème donné. Au même âge, les enfants n'utiliseraient donc pas les mêmes stratégies pour un même problème. Par exemple, pour résoudre  $4 + 3$ , certains enfants tendront plutôt à retrouver en mémoire le résultat alors que d'autres auront plus tendance à avoir recours au comptage sur les doigts. Dans notre travail, l'idée serait que plus les enfants vont compter sur leurs doigts de manière précoce pour résoudre des additions simples, plus ils vont pratiquer et utiliser des stratégies sophistiquées. Par exemple, pour résoudre  $3 + 2$ , à force de représenter séquentiellement 3 et 2 sur les doigts et de recompter l'ensemble pour parvenir au résultat, l'enfant va représenter directement sur les doigts, et non plus séquentiellement, le premier ou le plus grand des ensembles à additionner. Une stratégie encore plus efficace consistera ensuite à représenter directement chacun des opérandes à additionner. Lorsque l'enfant aura assez de pratique, il pourra alors reconnaître directement la configuration digitale formée, soit de

manière visuelle, soit de manière kinesthésique et ainsi produire le résultat sans comptage. La pratique permettrait donc le passage de stratégies rudimentaires où tous les éléments sont représentés de manière externe, comme la stratégie "All", à des stratégies où l'un des opérands est représenté mentalement comme la stratégie "Min". Cette évolution des stratégies permettrait ainsi d'expliquer comment les enfants peuvent à terme effectuer à des calculs de manière purement mentale (Baroody, 1987). Par conséquent, les enfants de notre recherche qui calculent précocement sur leurs doigts devraient s'extraire plus rapidement de cette stratégie que les enfants qui l'ont mise en place plus tardivement.

### III. Synthèse de la problématique

Tout au long de cette revue de la littérature, nous avons vu qu'il existe une relation entre gnosie digitale et performances arithmétiques chez les jeunes enfants (Fayol et al., 1998 ; Marinthe et al., 2001 ; Noël, 2005), même si certaines recherches ont conduit à nuancer la force de cette relation (Long et al., 2016 ; Newman, 2016). Un des premiers objectifs de cette recherche est donc de vérifier l'existence de ce lien entre gnosie digitale et performances arithmétiques chez les jeunes enfants. Pour ce faire, nous avons évalué les scores obtenus à la tâche de gnosie digitale et les performances obtenues dans une tâche d'additions simples chez des enfants en classe de 2P Harmos, âgés en moyenne de 6 ans. Une analyse corrélacionnelle entre les scores obtenus à la tâche de gnosie digitale et les performances obtenues à la tâche d'additions simples a ensuite été effectuée. Nous nous attendons à répliquer les résultats de la littérature, à savoir une corrélation positive entre les scores de gnosie digitale et les performances obtenues dans la tâche de calcul (Fayol et al., 1998, Marinthe et al., 2001 ; Noël, 2005). Pour vérifier que la relation entre gnosie digitale et performances arithmétiques ne soit pas due à un facteur général d'efficience, nous avons étudié l'impact de la mémoire de travail et de l'intelligence non verbale dans cette relation en effectuant une analyse de corrélation partielle. Nous nous attendons, comme dans les travaux de Costa et al. (2011), à ce que la mémoire de travail et l'intelligence non verbale n'aient aucun effet sur la relation entre gnosie digitale et performances arithmétiques.

De plus, nous avons vu que les travaux empiriques et théoriques de chercheurs spécialisés dans la cognition numérique ont fait émerger l'explication d'un lien fonctionnel entre gnosie digitale et habiletés arithmétiques, médiatisé par le comptage sur les doigts (Penner-Wilger et al., 2009 ; Reeve & Humberstone, 2011). Plus précisément, comme mentionné précédemment, l'idée serait ici que plus les gnosies digitales sont développées, mieux l'enfant pourrait représenter les

nombres sur ses doigts et, par conséquent, plus les quantités pourraient être facilement manipulées sur les doigts pour effectuer des calculs simples. Un autre objectif de ce travail de thèse est de tester cette proposition en effectuant une analyse de médiation. Nous nous attendons à ce que l'effet de la gnose digitale sur les performances arithmétiques disparaisse quand on contrôle l'effet de l'utilisation des doigts pour calculer sur la relation gnose digitale et performances arithmétiques.

Quels que soient les résultats obtenus à l'issue des analyses annoncées, le comptage sur les doigts constitue un élément central de notre problématique. En effet, même si les résultats de l'analyse de médiation venaient à montrer que le comptage sur les doigts ne constitue pas en fait un élément médiateur de la relation entre gnose digitale et performances arithmétiques, la relation entre comptage sur les doigts et performances arithmétiques n'en disparaîtrait pas pour autant. Nous avons vu que les enfants qui calculent sur leurs doigts en début d'apprentissage obtiennent de meilleures performances dans une tâche de calcul que ceux qui ne les utilisent pas. Par contre, à partir de 8 ans et demi, les enfants qui continuent de calculer sur leurs doigts sont moins performants que les enfants ayant abandonné cette stratégie (Jordan et al., 2008). En s'appuyant sur cette observation, nous nous attendons à obtenir une corrélation positive et significative entre le pourcentage d'utilisation des doigts pour calculer et le pourcentage de réussite dans la tâche d'additions simples chez les enfants âgés en moyenne de 6 ans, puis chez les enfants âgés en moyenne de 7 ans. Par contre, chez les enfants âgés en moyenne de 8 ans, nous prédisons, toujours en s'appuyant sur les résultats de Jordan et al. (2008), une diminution de cette corrélation voire une corrélation inverse entre le pourcentage d'utilisation des doigts pour calculer et le pourcentage de réussite dans la tâche d'additions. L'analyse de corrélation a été réalisée en prenant en compte la taille des problèmes, selon que la somme est inférieure ou supérieure à 10. Une analyse de variance a également été réalisée pour comparer le taux de réussite à la tâche d'additions simples entre le groupe des enfants qui calcule sur leurs doigts et le groupe des enfants qui ne calcule pas sur leurs doigts.

En complément de l'étude de Jordan et al. (2008), nous chercherons à déterminer les caractéristiques des enfants âgés en moyenne de 6 ans qui calculent sur leurs doigts dans la tâche d'additions simples. L'âge de 6 ans a été choisi car Jordan et al. (2008) ont justement montré qu'à cet âge-là, la corrélation entre l'utilisation des doigts pour calculer et les performances en arithmétique était positive et significative. Comme mentionné précédemment, il existe deux possibilités qui n'ont pas été clairement étudiées à ce jour. La première serait que les enfants avec une faible mémoire de travail pourraient avoir besoin de recourir à leurs doigts afin d'alléger la charge mémorielle inhérente à l'accomplissement du calcul (Crollen & Noël, 2015). A l'inverse, la

deuxième possibilité propose que la stratégie de comptage sur les doigts pourrait être difficile à mettre en place par des enfants dont l'efficacité cognitive est limitée et, dans ce cas, les enfants présentant les plus fortes ressources en mémoire de travail pourraient correspondre aux enfants qui mettent en place la stratégie le plus précocement et efficacement (Halford, 1993). Pour trancher entre ces deux hypothèses, nous avons mesuré les capacités en mémoire de travail des enfants âgés en moyenne de 6 ans ainsi que leur intelligence non verbale afin d'obtenir un indice général d'efficacité. Nous avons également évalué leurs performances dans la tâche d'additions simples et nous avons observé si les enfants utilisaient ou non leurs doigts pour résoudre les calculs. D'un point de vue statistique, une analyse de corrélation a été effectuée entre l'empan de mémoire de travail et le pourcentage d'utilisation des doigts pour calculer. Une autre analyse de corrélation a également été effectuée entre le score obtenu au test des Matrices Progressives de Raven Couleur et le pourcentage d'utilisation des doigts pour calculer. Des tests d'indépendance du  $\chi^2$  ont également été effectués sur le nombre d'enfants qui utilisent leurs doigts pour calculer dans la tâche d'additions simples et le groupe de mémoire de travail auxquels ils appartiennent (i.e. fortes ou faibles capacités). Ces mêmes tests ont été conduits sur le nombre d'enfants qui utilisent leurs doigts pour calculer dans la tâche d'additions simples et le groupe d'intelligence non verbale auquel ils appartiennent (i.e. fortes ou faibles capacités).

De plus, dans ce travail, nous avons déterminé si le choix de stratégies plus ou moins matures est lié aux capacités en mémoire de travail des enfants. Pour cela, nous avons établi les stratégies de calcul sur les doigts utilisées par les enfants âgés en moyenne de 6 ans dans la tâche d'additions simples. Nous avons ensuite déterminé la proportion de ces stratégies (i.e. "All", "First", "Min") et le taux de réussite associé à chaque stratégie en fonction de la taille du problème (i.e. somme inférieure ou supérieure à 10) et des capacités en mémoire de travail des enfants (i.e. fortes ou faibles). Un test d'indépendance du  $\chi^2$  a ensuite été effectué sur le nombre d'enfants qui utilisent une stratégie de comptage sur les doigts (i.e. "All", "First" ou "Min") et les capacités en mémoire de travail de ces enfants (i.e. fortes ou faibles). Une analyse descriptive mettra en lien les performances avec le type de stratégie utilisée en fonction des capacités en mémoire de travail.

En outre, ce suivi longitudinal nous a permis d'établir les trajectoires développementales des enfants qui calculent et qui ne calculent pas sur leurs doigts. Pour cela, nous avons considéré un groupe d'enfants de 6 ans qui calcule au moins une fois à l'aide des doigts et un groupe d'enfants du même âge qui n'utilise pas ses doigts dans les calculs. Nous avons ensuite suivi leur évolution tant au niveau de l'utilisation des doigts pour calculer que de leurs performances à la tâche d'additions simples sur les trois années consécutives. Des analyses statistiques et descriptives ont été effectuées afin d'observer cette évolution.

En ce qui concerne l'évolution des stratégies de comptage sur les doigts dans la tâche de calcul, nous avons vu dans l'introduction que les enfants utilisent d'abord des stratégies de calcul sur les doigts rudimentaires et peu efficaces comme la stratégie "All" puis ces stratégies sont remplacées par des stratégies plus sophistiquées et efficaces comme la stratégie "First" et la stratégie "Min" (Baroody, 1987). D'après cette description, nous suggérons que lorsque les enfants commencent à utiliser leurs doigts pour calculer, ils utilisent d'abord la stratégie "All" puis la stratégie "First" et enfin la stratégie "Min". Pour répondre à cette hypothèse, nous avons identifié pour chaque enfant et lors de chaque année de recherche le type de stratégie utilisée pour résoudre chaque addition. On s'attend à observer une diminution du pourcentage d'utilisation de la stratégie "All" et une augmentation des stratégies "First" et "Min" au cours des trois années de recherche. Une analyse descriptive de cette évolution sera présentée.

Pour finir, selon Baroody (1987), la pratique permettrait aux enfants d'utiliser des stratégies de plus en plus sophistiquées et efficaces. Cette pratique leur permettrait à terme de s'affranchir de leurs doigts pour calculer et d'effectuer des calculs de manière purement mentale. D'après cette observation, nous suggérons que plus les enfants vont calculer sur leurs doigts précocement, plus ils vont pratiquer et utiliser des stratégies sophistiquées et par conséquent, s'extraire plus rapidement de la stratégie de calcul sur les doigts. Pour tester cette hypothèse, une analyse descriptive de l'évolution des stratégies de calcul sur les doigts sera présentée. Nous observerons si les enfants qui utilisent leurs doigts pour calculer dès l'âge de 6 ans et qui les abandonnent entre 7 et 8 ans sont également les enfants qui utilisaient le plus des stratégies sophistiquées l'année précédente.

# Partie 2

## **Partie empirique**



## I. Eléments de méthodologie

### 1. Participants

Cette étude consiste en un suivi longitudinal mené sur trois années consécutives auprès d'enfants âgés en moyenne de 6 ans au début de l'étude et de 8 ans à la fin de l'étude. Sept classes issues de six écoles du canton de Genève ont participé à cette recherche. Ces classes nous ont été attribuées par le Département de l'Instruction Publique, de la Culture et du Sport (DIP) de l'Etat de Genève. Lors de la première année, notre échantillon était constitué de 86 élèves. Lors de la deuxième année, nous avons subi une perte expérimentale de 4 élèves et de 6 élèves lors de la dernière année. Notre échantillon final est donc constitué de 76 élèves, dont 43 filles, suivis depuis leur scolarisation en 2P Harmos jusqu'en 4P Harmos. L'âge moyen des 76 enfants retenus est de 6 ans et 2 mois lors de la première année. Chaque année, les enfants ont été évalués durant le second semestre de scolarité entre la fin du mois de Février et le milieu du mois de Juin.

Les participants de cette étude sont des élèves tout-venants, ayant suivi une scolarité normale c'est-à-dire qu'aucun d'entre eux n'a eu une scolarité tardive ou interrompue. De plus, aucun des élèves ne présentait de diagnostic de troubles du développement ou des apprentissages. Précisons toutefois qu'un enfant a doublé la classe de 3P Harmos. Préalablement à l'expérimentation, les parents ont reçu une lettre d'information concernant les objectifs et le déroulement de l'étude. Ils ont ensuite rempli un formulaire de consentement de participation à l'étude et seuls les enfants dont les parents ont donné leur accord ont participé à la recherche. Cette recherche a été validée par le comité d'Ethique de la FAPSE à l'Université de Genève.

Un court questionnaire a été rempli par les enseignants afin de savoir précisément quelles pratiques éducatives étaient appliquées en classe lors des cours de mathématiques. Il s'agissait d'un questionnaire de trois questions, que nous avons confectionné au préalable et dans lequel les réponses des enseignants étaient mesurées selon une échelle de Lickert allant de 0 (i.e. pas du tout) à 7 (i.e. tout à fait). Tous les enseignants ont indiqué que le comptage sur les doigts n'était pas enseigné explicitement en classe lors des activités mathématiques. Par contre, les enfants n'étaient pas non plus découragés à utiliser cette stratégie, à l'exception des problèmes additifs dont la somme était inférieure à 10 et dont le résultat devait être rapidement retrouvé en mémoire. En fait, lorsque les doigts sont utilisés, ils le sont principalement pour représenter les quantités à manipuler plutôt que pour effectuer des calculs. Il reste à noter ici qu'en Suisse romande, les enseignants doivent suivre un programme d'enseignement strict (i.e. PER : Plan d'Etude Romand), et ne peuvent donc pas appliquer leurs propres méthodes pédagogiques. Par conséquent, les enfants de

notre étude avaient une expérience formelle similaire du comptage sur les doigts lorsque nous les avons testés.

## 2. Procédure et matériel

Au total, 11 épreuves ont été administrées à tous les participants. Chaque enfant a été évalué individuellement pendant deux sessions d'environ 30 minutes par an, et ce sur trois années consécutives. Plus précisément, lors de la première année de recherche, sept tâches ont été proposées aux enfants. Il s'agit d'une tâche d'additions simples, utilisée pour évaluer les compétences en arithmétique des enfants et observer leur stratégie de calcul pour résoudre les additions. Il s'agit également de la tâche des images (Lafay et al., 2013) et la tâche de l'épaule (Crollen, Mahe, Collignon & Seron, 2011) afin d'observer l'utilisation spontanée du comptage sur les doigts. Nous avons aussi utilisé la tâche de gnosie digitale (Noël, 2005) pour évaluer les habiletés manuelles. De plus, la tâche du "*give a number*" a été utilisée pour évaluer les capacités de dénombrement. En outre, les capacités de comptage verbal ont été étudiées. Pour cela, nous avons évalué les capacités de récitation orale de la suite numérique jusqu'à 30. Enfin, le test du Digit span a été utilisé pour mesurer les capacités en mémoire de travail (Wechsler, 1939).

Lors de la deuxième année d'étude, les mêmes enfants ont de nouveau été évalués individuellement sur chacune des tâches présentées ci-dessus pendant deux sessions d'environ 30 minutes mais aussi sur le test d'intelligence des Matrices de Raven couleurs (Raven et al., 2003).

Enfin, lors de la dernière année de recherche, nous avons retiré la tâche du "*give a number*" et la tâche de comptage verbal ainsi que la tâche des Matrices de Raven couleurs. A la place, trois autres tâches ont été incluses. Il s'agit tout d'abord du test de l'Alouette (Lefavrais, 1967), utilisé pour évaluer les compétences en lecture des enfants. Il s'agit ensuite du test du Nine pegboard (Poole et al, 2005), utilisé pour évaluer la dextérité digitale. Finalement, un test de vitesse de traitement a été intégré à l'étude, dans lequel les enfants devaient indiquer le plus vite possible l'orientation de flèches.

Lors des trois années de recherche, l'ordre des tâches a été contrebalancé en fonction du numéro du participant. Pour ce travail de thèse, les résultats sur 7 épreuves ont été pris en compte. Il s'agit de la tâche d'additions simples, de la tâche de gnosie digitale, de la tâche de mémoire de travail, des Matrices de Raven couleurs, de la tâche de dénombrement, de comptage verbal et enfin du test de lecture l'Alouette.

## 2.1. Evaluation des compétences en arithmétique

Pour évaluer les compétences en arithmétique, nous avons utilisé une tâche de résolution d'additions simples. C'est une épreuve non informatisée que nous avons élaborée. Cette tâche permet également d'observer les différentes stratégies de calcul sur les doigts utilisées par les enfants (i.e. "All", "First" et "Min"). Pour déterminer ces stratégies, le comportement de chaque enfant était filmé à l'aide d'un stylo caméra placé discrètement sur la table. Afin d'observer les éventuelles différences de stratégies et de réussite entre les petites et les grandes additions, six additions avec un résultat inférieur à 10 et six additions avec un résultat supérieur à 10 ont été créées. Pour maximiser les chances d'utilisation du comptage sur les doigts lors de la résolution des additions, aucune addition comprenant de zéro ou répétant le même opérande n'était proposée (cf. figure 2).

Cette épreuve est individuelle et dure environ 5 minutes. On présente à chaque enfant les 12 additions à un chiffre et dont le résultat varie entre 3 et 16. Chaque addition est présentée en colonne pour respecter le format standard d'apprentissage des additions à l'école. L'enfant doit résoudre le plus d'additions possible dans un temps limité de 10 minutes. Pour permettre à l'enfant d'utiliser la stratégie de comptage qu'il souhaite et pour éviter qu'il soit gêné par le maintien d'un stylo, nous avons confectionné des stickers correspondant au résultat de chaque addition. L'enfant doit déterminer le sticker correspondant au résultat de l'addition et le coller en dessous du problème. Le résultat des 12 additions est représenté deux fois sur un sticker différent pour éviter que l'enfant déduise ou devine la réponse au cours de la tâche en observant les stickers restants. Au total 24 stickers ont donc été confectionnés. L'enfant effectue d'abord un entraînement avec l'expérimentateur sur l'addition  $2+1$ . Une fois l'entraînement réussi, l'expérimentateur s'éloigne de l'enfant et le laisse continuer seul. En effet, comme le comptage sur les doigts n'est pas toujours valorisé à l'école, le but de cette procédure est que l'enfant ne soit pas dérangé par le regard de l'adulte et puisse utiliser la stratégie de comptage qu'il désire.

La variable mesurée est le score global de réussite, où chaque bonne réponse équivaut à 1 point. Les réponses sont reportées sur la feuille de cotation par l'expérimentateur. L'utilisation des doigts a ensuite été codée sur la base des enregistrements vidéo.

Petites additions	Grandes additions
1+6	6+7
2+1	7+4
2+3	7+8
3+5	8+4
3+6	8+6
4+2	9+7

Figure 2. Liste des douze additions présentées à chaque enfant.

## 2.2. Evaluation des habiletés manuelles

Pour évaluer les habiletés manuelles des enfants, nous avons utilisé la tâche de gnosies digitales, élaborée par Noël (2005). Le matériel consiste en une boîte en carton possédant deux ouvertures en demi-cercles dans sa partie inférieure, permettant ainsi à l'enfant de mettre ses poignets et avant-bras, sans pour autant qu'il puisse voir les manipulations de l'expérimentateur. Les stimulations varient selon trois conditions. Dans la condition "isolée", l'expérimentateur stimule un seul doigt de l'enfant. Dans la condition "simultanée", l'expérimentateur touche deux doigts d'une même main en même temps tandis que dans la condition "successive", deux doigts d'une même main sont touchés l'un après l'autre. L'épreuve comporte 22 essais et la main droite et la main gauche sont toutes les deux stimulées 11 fois dont 5 fois de manière isolée, 3 fois de manière simultanée et 3 fois de manière successive.

Lors de cette tâche, l'expérimentateur et l'enfant sont assis autour d'une table et se trouvent l'un en face de l'autre. L'enfant pose ses mains, paumes contre la table et doigts écartés. L'expérimentateur place la boîte en carton au niveau des poignets de l'enfant avant de stimuler un ou plusieurs doigts. L'expérimentateur enlève ensuite la boîte en carton et demande à l'enfant de lui montrer les doigts venant d'être stimulés avec la main non stimulée.

La variable mesurée est un score global de gnosie digitale où chaque réponse correcte vaut 1 point. L'ordre dans lequel l'enfant montre les doigts stimulés n'est pas pris en compte lors de la cotation. Par exemple, si l'expérimentateur touche l'index puis le majeur et que l'enfant montre le

majeur puis l'index, la réponse est considérée comme correcte. Les réponses sont reportées sur la feuille de cotation par l'expérimentateur.

### 2.3. Evaluation des capacités cognitives générales

#### a) Digit span

Pour déterminer les capacités de stockage en mémoire de travail et obtenir un indice d'efficacité général des enfants, le subtest *Mémoire des chiffres*, issu de l'Echelle d'Intelligence pour les enfants de Weschler-4<sup>ème</sup> édition a été utilisé. Dans cette épreuve, l'enfant doit répéter dans l'ordre inverse une liste de chiffres prononcés par l'expérimentateur. Les chiffres sont prononcés par l'expérimentateur à un rythme d'environ un chiffre par seconde mais l'enfant n'a pas de temps limite pour les répéter. La tâche est constituée de huit séries de chiffres dont la longueur varie de 2 à 8 chiffres. Chaque série est constituée de deux essais où les chiffres varient de 1 à 9. La tâche se termine une fois que l'enfant a échoué à deux essais consécutifs de même longueur. L'empan de l'enfant correspond à la série de chiffres la plus longue qu'il a pu rappeler.

#### b) Matrices Progressives de Raven Couleur

Cette épreuve mesure l'intelligence non verbale. Elle est composée de 36 problèmes, divisés en trois séries, A, Ab et B, de 12 items chacune. Chaque item se compose d'une matrice ou d'un dessin incomplet que l'enfant doit compléter avec l'une des six options proposées en dessous de la matrice. Les difficultés sont croissantes pour chaque série mais également entre chaque série. Plus précisément, la série A est plus facile que la série Ab qui est plus facile que la série B. L'ordre de présentation des items permet un apprentissage de la méthode de travail. Les trois séries fournissent trois occasions de saisir la méthode de pensée requise pour résoudre les problèmes et permettent trois estimations progressives de la capacité intellectuelle de l'enfant. La série A est purement perceptive et mesure l'aptitude à compléter des patterns continus. La série Ab est quant à elle figurative et mesure l'aptitude du participant à percevoir des figures discontinues. Enfin, la dernière série B est conceptuelle et mesure l'aptitude de l'enfant à raisonner par analogie. Les normes de cette épreuve ont été établies sur une population de 4 à 11 ans ½ (E.C.P.A, 1998). La note finale obtenue est le nombre total de problèmes résolus correctement dans un temps limité de 20 minutes. On compare ensuite cette note à l'étalonnage le plus approprié.

#### 2.4. Evaluation des capacités de dénombrement

La tâche du "*give a number*" a été utilisée. Cette tâche est une adaptation de la tâche du *Trade* utilisée par Rousselle et Noël (2008). Elle a été conçue pour évaluer l'acquisition d'un des principes du dénombrement, celui de la correspondance terme à terme. Ici, l'expérimentateur demande simplement à l'enfant de lui donner un certain nombre de lego. Par exemple "Peux-tu me donner 3 lego ? ". Les collections varient de 3 à 14. Il y a six collections à traiter au total. Les enfants réussissent l'essai quand ils donnent le nombre de lego correspondant à celui énoncé par l'expérimentateur. La variable mesurée est le score de bonnes réponses où chaque réponse correcte vaut 1 point. On obtient un score total sur 6.

#### 2.5. Evaluation des capacités de comptage verbal

Nous nous sommes intéressés à la mémorisation de la suite orale des nombres car c'est un outil dont la maîtrise est essentielle pour une bonne utilisation des nombres. L'enfant doit alors réciter à voix haute la comptine numérique jusqu'à 30.

#### 2.6. Evaluation des capacités de lecture

Pour évaluer les capacités de lecture des enfants, nous avons utilisé le test de l'Alouette. L'objectif de ce test est d'attribuer un niveau de lecture correspondant à la précision et à la rapidité de la lecture d'un texte dépourvu de sens, de 265 mots au total. On explique à l'enfant qu'il doit lire le texte à voix haute, le mieux possible, sans lire le titre, et qu'on l'arrêtera au bout de 3 minutes même s'il n'a pas terminé. On l'informe également que ce texte n'a pas vraiment de sens mais que cela n'a pas d'importance car il n'y a rien à comprendre. Si l'enfant bute sur un mot, on attend 5 secondes et on lui dit de passer au mot suivant. Chaque mot sauté ou mal lu est barré. Par contre, un mot mal lu initialement puis corrigé n'est pas décompté comme une erreur. On note le temps de lecture en secondes et on compte le nombre de mots lus et le nombre d'erreurs.

## II. Résultats

---

### Analyse des résultats chez les enfants de 2P (6 ans)

---

Pour cette première partie de résultats, les analyses portent uniquement sur les données récoltées lors de la première année de recherche, c'est-à-dire sur les enfants de 2P, âgés en moyenne de 6 ans (tranche d'âge de 65 mois (5; 5 mois) à 81 mois (6; 9 mois)). Les enfants ont été évalués durant le second semestre de scolarité entre la fin du mois de Février et le milieu du mois de Juin. Neuf variables ont été traitées. Il s'agit des scores obtenus dans la tâche de gnosie digitale, des scores obtenus aux Matrices Progressives de Raven Couleur et de l'empan en mémoire de travail. Il s'agit aussi du pourcentage de réussite pour toutes les additions ainsi que du pourcentage de réussite pour les additions inférieures et supérieures à 10. Enfin, il s'agit du pourcentage d'utilisation des doigts dans la tâche d'additions pour toutes les additions et pour les additions inférieures et supérieures à 10.

#### 1. Le lien entre gnosie digitale et performances arithmétiques

Descriptivement, les scores de gnosie digitale varient entre 10 et 22 points ( $M = 16.74$  ;  $SD = 2.71$ ). Une analyse de corrélation entre le score obtenu à la tâche de gnosie digitale et le pourcentage de réussite obtenu à la tâche d'additions simples a révélé que ces deux variables sont liées positivement ( $r = .25$ ,  $p = .03$ ). Ces données confirment le lien établi dans la littérature entre ces variables. Une analyse de corrélation partielle a été effectuée en contrôlant le lien entre gnosie digitale et performances arithmétiques par la mémoire de travail. Cette analyse a pu être effectuée car une corrélation significative entre la gnosie digitale et la mémoire de travail a bien été observée ( $r = .24$ ,  $p = .040$ ) ainsi qu'une corrélation entre la mémoire de travail et les performances en calcul ( $r = .39$ ,  $p < .001$ ). Les résultats n'ont pas révélé de lien significatif entre la gnosie digitale et les performances à la tâche d'additions simples, une fois l'effet de la mémoire de travail contrôlé ( $r = .17$ ,  $p = .14$ ). Ces résultats suggèrent que le lien entre la gnosie digitale et les performances arithmétiques est expliqué par un facteur plus général d'efficacité cognitive.

Nous avons effectué une autre corrélation partielle en contrôlant cette fois-ci le lien entre gnosie digitale et performances arithmétiques par une mesure plus directe de l'intelligence générale, c'est-à-dire les Matrices Progressives de Raven Couleur. Cette analyse a pu être effectuée

car une corrélation significative entre la gnosie digitale et les Matrices de Raven a bien été observée ( $r = .27, p = .02$ ) ainsi qu'une corrélation entre les Matrices de Raven et les performances en calcul ( $r = .39, p < .001$ ). Les résultats de la corrélation partielle effectuée sur le lien entre la gnosie digitale et les performances arithmétiques n'ont pas révélé de lien significatif entre la gnosie digitale et les performances obtenues à la tâche d'additions simples, une fois l'effet de l'intelligence non verbale contrôlé ( $r = .17, p = .14$ ). Ces résultats suggèrent que le lien entre la gnosie digitale et les performances arithmétiques est expliqué par un facteur plus général d'intelligence. D'après cette observation, nous devrions également observer une corrélation entre les performances obtenues en lecture du test de l'Alouette et les performances obtenues au test évaluant les gnosies digitales. Or, les résultats de la corrélation effectuée entre les scores de gnosie digitale et l'indice de précision en lecture montrent que ces deux variables ne sont pas significativement liées ( $r = -.004, p = .98$ ). Il en est de même lorsqu'on s'intéresse à la corrélation entre les scores de gnosie digitale et l'indice de vitesse de lecture ( $r = .070, p = .55$ ).

## 2. Hypothèse de médiation

Pour tester l'hypothèse de médiation selon laquelle le comptage sur les doigts serait responsable du lien entre gnosie digitale et performances arithmétiques, une corrélation doit être observée entre gnosie digitale et utilisation des doigts pour calculer. Or, la corrélation entre ces deux variables n'est pas significative ( $r = .11, p = .31$ ). Notre hypothèse n'est donc pas validée.

## 3. Caractéristiques cognitives générales des enfants et comptage sur les doigts dans la tâche d'additions simples

Pour déterminer les caractéristiques cognitives des enfants âgés entre 5 et 6 ans qui calculent avec leurs doigts, nous avons formé deux groupes d'enfants (i.e. fortes capacités vs faibles capacités) en fonction de leur empan en mémoire de travail. Les enfants qui ont obtenu un score entre 0 et 2 à la tâche de mémoire de travail ont été considérés comme les enfants présentant de faibles capacités en mémoire de travail et les enfants ayant obtenu un score entre 3 et 4 ont été considérés comme les enfants avec de hautes capacités en mémoire de travail. Sur les 76 enfants, 31 des enfants ont été catégorisés comme des enfants avec de fortes capacités en mémoire de travail et 45 comme des enfants présentant de faibles capacités en mémoire de travail.

Une analyse de corrélation a été réalisée entre les empan en mémoire de travail et le pourcentage d'utilisation des doigts pour calculer lors de la résolution des 12 additions. Les résultats montrent que ces deux variables sont liées positivement c'est-à-dire que les enfants avec de plus fortes capacités en mémoire de travail sont les enfants qui utilisent le plus leurs doigts pour calculer ( $r = .26, p = .03$ ). Cette corrélation a été confirmée par un test d'indépendance du  $\chi^2$ , effectué pour étudier la relation entre le nombre d'enfants qui utilisent leurs doigts pour calculer et le groupe de mémoire de travail auquel ils appartiennent (i.e. fortes ou faibles capacités) (cf. tableau 1). Les résultats de ce test ont révélé que ces deux variables ne sont pas indépendantes l'une de l'autre ce qui suggère que l'utilisation des doigts pour calculer et les capacités en mémoire de travail sont liées,  $X^2(1) = 6.61, p = .01$ . La corrélation entre les empan en mémoire de travail et le pourcentage d'utilisation des doigts pour calculer reste significative pour les grandes additions ( $r = .31, p = .006$ ). Cette corrélation a également été confirmée par un test d'indépendance du  $\chi^2$  ( $X^2(1) = 7.61, p = .006$ ). Par contre, la corrélation entre les empan en mémoire de travail et le pourcentage d'utilisation des doigts n'est pas significative pour les petites additions ( $r = .16, p = .16$ ).

Tableau 1.

*Nombre d'enfants qui utilisent et qui n'utilisent pas leurs doigts dans la tâche d'additions en fonction des capacités en mémoire de travail (fortes ou faibles).*

Mdt	Utilisation des doigts	
	Toutes les additions	Ø doigts
Fortes capacités	23	8
Faibles capacités	20	25
Additions <10		
Fortes capacités	21	10
Faibles capacités	20	25
Additions >10		
Fortes capacités	21	10
Faibles capacités	16	29

En résumé, ces données vont dans le sens de l'hypothèse selon laquelle ce sont les enfants avec de plus fortes capacités en mémoire de travail qui calculent sur leurs doigts. Dans cette perspective et comme mentionné dans l'introduction, les capacités en mémoire de travail ne sont

plus étudiées ici vraiment pour elles-mêmes mais plutôt comme une mesure indirecte de l'efficacité cognitive générale. C'est la raison pour laquelle les mêmes analyses ont été conduites en prenant en compte cette fois-ci une mesure plus directe pour évaluer l'intelligence générale, à savoir les Matrices Progressives de Raven Couleur. Nous avons également formé deux groupes d'enfants (i.e. fortes capacités vs faibles capacités) en fonction de leurs scores obtenus à la tâche des Matrices Progressives de Raven Couleur. Les enfants qui ont obtenu un score entre 9 et 27 ont été considérés comme les enfants présentant de faibles capacités en intelligence non verbale et les enfants ayant obtenu un score entre 28 et 35 ont été considérés comme les enfants avec de fortes capacités en intelligence non verbale. Sur les 76 enfants, 45 des enfants ont été catégorisés comme des enfants avec de fortes capacités en intelligence non verbale et 36 comme des enfants présentant de faibles capacités en intelligence non verbale.

La corrélation entre les scores des Matrices de Raven et le pourcentage d'utilisation des doigts pour calculer est positive et significative ( $r = .27, p = .02$ ). Les enfants avec de plus fortes capacités en intelligence non verbale sont aussi les enfants qui utilisent le plus leurs doigts pour calculer. Cette corrélation a été confirmée par un test d'indépendance du  $\chi^2$  (cf. tableau 2). Les résultats de ce test ont révélé que ces deux variables ne sont pas indépendantes l'une de l'autre, ce qui suggère que l'utilisation des doigts pour calculer et l'intelligence non verbale sont liées,  $X^2(1) = 4.10, p = .04$ . La corrélation reste significative quelle que soit la taille du problème ( $r = .23, p = .05$  pour les petites additions et  $r = .28, p = .02$  pour les grandes additions).

Tableau 2.

*Nombre d'enfants qui utilisent et qui n'utilisent pas leurs doigts dans la tâche d'additions en fonction des capacités en intelligence non verbale (fortes ou faibles).*

<b>Raven</b>	Utilisation des doigts	
	Utilisation des doigts	Ø doigts
	Toutes les additions	
Fortes capacités	27	16
Faibles capacités	13	20
	Additions <10	
Fortes capacités	25	16
Faibles capacités	15	20
	Additions >10	
Fortes capacités	23	14
Faibles capacités	17	22

En résumé, l'ensemble de ces données montre que la mémoire de travail et l'intelligence non verbale sont en lien avec la fréquence d'utilisation des doigts pour calculer. Afin de déterminer laquelle des deux variables entre la mémoire de travail et l'intelligence non verbale explique le mieux la fréquence d'utilisation des doigts pour calculer, une analyse de régression pas à pas (stepwise) a été effectuée (cf. tableau 3). Dans un premier modèle l'intelligence non verbale est introduite en première variable et la mémoire de travail en deuxième variable. Le modèle complet explique 9.6% dans la variabilité de l'utilisation des doigts pour calculer. Que ce soit pour le premier ou le deuxième modèle, lorsque le deuxième facteur est introduit, il n'apporte pas de part supplémentaire significative à l'explication des données. Ainsi, ni la mémoire de travail ni l'intelligence non verbale ne contribuent de manière unique à l'explication de la variabilité de l'utilisation des doigts pour calculer. Ce résultat peut s'expliquer par le fait que ces deux variables sont corrélées entre elles ( $r = .42, p < .001$ ). Dans la suite de ce travail, nous avons décidé de garder la mémoire de travail comme seul facteur d'efficacité cognitive car selon nous, elle est un concept mieux défini pour évaluer l'intelligence des enfants.

Tableau 3.

*Régression par stepwise.*

	<b>R<sup>2</sup></b>	<b>Δ R<sup>2</sup></b>	<b>F</b>
<b>Modèle 1</b>			
Pas 1 Raven	.073	.073	F significatif (p = .019)
Pas 2 Raven + MdT	.096	.023	F non significatif (p = .176)
	<b>R<sup>2</sup></b>	<b>Δ R<sup>2</sup></b>	<b>F</b>
<b>Modèle 2</b>			
Pas 1 MdT	.063	.063	F significatif (p = .030)
Pas 2 MdT + Raven	.096	.033	F non significatif (p = .109)

#### 4. Utilisation des doigts pour calculer et performances arithmétiques

##### a) Utilisation des doigts et performances arithmétiques sur toutes les additions

Une ANOVA avec le facteur inter utilisation des doigts pour calculer dans au moins une des additions (i.e. "oui" vs "non") sur le pourcentage de réussite à la tâche d'additions simples a été réalisée. Les résultats de cette analyse montrent un effet significatif du calcul sur les doigts sur la réussite totale à la tâche d'additions,  $F(1, 74) = 29.80, p < .001, \eta_p^2 = .29$ . Une nouvelle ANOVA a été réalisée avec le facteur inter utilisation des doigts pour calculer (i.e. "oui" vs "non") pour les petites additions sur le pourcentage de réussite de ces additions. Les résultats montrent que les enfants qui utilisent leurs doigts au moins une fois pour résoudre les petites additions ont de meilleures performances que ceux qui ne les utilisent pas,  $F(1, 74) = 22.70, p < .001, \eta_p^2 = .23$ . Il en est de même lorsqu'on s'intéresse à l'utilisation des doigts pour calculer et à la réussite arithmétique des grandes additions,  $F(1, 74) = 23.08, p < .001, \eta_p^2 = .24$ . Dans l'ensemble, ces résultats montrent que les enfants qui calculent sur leurs doigts obtiennent de meilleures performances que ceux qui ne les utilisent pas (cf. tableau 4).

Une analyse de corrélation a été effectuée entre le pourcentage d'utilisation des doigts pour calculer et le pourcentage de réussite à la tâche d'additions simples. Les résultats montrent que ces deux variables sont liées positivement ( $r = .52, p < .001$ ). La corrélation entre ces deux variables reste positive et significative quelle que soit la taille du problème ( $r = .43, p < .001$  pour les petites additions et  $r = .49, p < .001$  pour les grandes additions). Ainsi, l'ensemble de ces résultats

confirment les données de Jordan et al. (2008) et montrent que les enfants âgés en moyenne de 6 ans qui utilisent leurs doigts pour calculer sont plus performants dans la tâche d'additions (.58) par rapport aux enfants qui ne les utilisent pas dans cette tâche (.23) (cf. tableau 4).

Tableau 4.

*Taux de réussite à la tâche d'additions simples des enfants qui calculent et qui ne calculent pas sur leurs doigts en fonction de la taille du problème et des capacités en mémoire de travail.<sup>1</sup>*

	<b>Utilisation des doigts pour calculer</b>	
	Oui (43)	Non (33)
<b>Toutes les additions</b>	0.58	0.23
MdT	2.6	2
<b>Petites additions</b>	0.76	0.39
MdT	2.5	2.09
<b>Grandes additions</b>	0.44	0.11
MdT	2.6	2.05

<sup>1</sup> Les enfants qui calculent et qui ne calculent pas sur leurs doigts pour les petites additions ne correspondent pas aux mêmes enfants qui calculent et qui ne calculent pas sur leurs doigts pour toutes les additions. De même, les enfants qui calculent et qui ne calculent pas sur leurs doigts pour les grandes additions ne correspondent pas aux mêmes enfants qui calculent et qui ne calculent pas sur leurs doigts pour toutes les additions.

b) Utilisation des doigts et performances arithmétiques par opération

Nous avons voulu déterminer si les enfants qui utilisent leurs doigts dans la tâche d'additions simples obtiennent de meilleures performances que les enfants qui n'utilisent jamais leurs doigts pour calculer même lorsqu'ils n'utilisent pas leurs doigts. En effet, il se pourrait que les meilleures performances des premiers soient dues à l'utilisation des doigts pour les calculs, supériorité qui disparaîtrait lorsqu'ils ne les utilisent plus. Nous avons donc calculé le pourcentage de résolution correcte pour chaque addition résolue avec et sans les doigts chez les enfants qui utilisent leurs doigts, et le pourcentage de résolution correcte pour chaque addition chez les enfants qui n'utilisent jamais leurs doigts pour calculer (cf. tableau 5).

Tableau 5.

*Taux de réussite pour chaque addition chez les 43 enfants qui utilisent leurs doigts lorsqu'ils utilisent et n'utilisent pas leurs doigts pour calculer et taux de réussite pour chaque addition chez les 33 enfants qui n'utilisent jamais leurs doigts pour calculer et moyenne du taux de réussite pour chaque catégorie.*

	2+1	3+5	1+6	3+6	2+3	4+2	6+7	7+8	7+4	9+7	8+6	8+4	Moy
<b>Utilisateurs des doigts pour calculer</b>													
% de résolution correcte <b>sans les doigts</b>	<b>.93</b>	.43	.73	.57	.92	.63	.20	.17	.38	.20	.40	.38	<b>.49</b>
% de résolution correcte <b>avec les doigts</b>		.78	.68	.58	.87	.83	.37	.32	.54	.37	.42	.60	<b>.58</b>
<b>Non utilisateurs des doigts pour calculer</b>													
% de résolution correcte <b>sans les doigts</b>	<b>.52</b>	.27	.42	.21	.39	.21	.09	.12	.21	.09	.06	.12	<b>.23</b>

Les enfants qui utilisent leurs doigts dans la tâche d'additions simples obtiennent en moyenne de meilleures performances même lorsqu'ils ne les utilisent pas (.49) que les enfants qui n'utilisent jamais leurs doigts pour calculer (.23). Les enfants qui n'utilisent jamais leurs doigts pour calculer réussissent nettement moins bien l'addition 2+1 (.52) que les enfants qui n'utilisent pas leurs doigts sur cette addition mais qui les utilisent dans au moins une des autres additions (.93).

Les enfants qui utilisent leurs doigts pour calculer réussissent en moyenne aussi bien les additions lorsqu'ils les utilisent (.58) que lorsqu'ils ne les utilisent pas (.49). Lorsqu'on s'intéresse aux grands utilisateurs des doigts, c'est-à-dire aux enfants qui utilisent leurs doigts pour calculer dans au moins 9 additions sur 12, on observe qu'ils réussissent en moyenne aussi bien les additions lorsqu'ils n'utilisent pas leurs doigts (.65) que lorsqu'ils les utilisent (.61) (cf. tableau 6).

Tableau 6.

*Taux de réussite pour chaque addition chez les 33 enfants qui utilisent leurs doigts pour calculer dans au moins 9 additions sur 12 lorsqu'ils utilisent ou n'utilisent pas leurs doigts pour calculer et moyenne du taux de réussite pour chaque catégorie.*

	2+1	3+5	1+6	3+6	2+3	4+2	6+7	7+8	7+4	9+7	8+6	8+4	Moy
<b>Grands utilisateurs des doigts pour calculer</b>													
% de résolution correcte <b>sans les doigts</b>	.97	.00	1.00		1.00	1.00		.00	.50		1.00	.67	.65
% de résolution correcte <b>avec les doigts</b>		.75	.67	.58	.93	.81	.30	.31	.48	.30	.38	.57	.61

Enfin, chez les 43 enfants qui utilisent au moins une fois leurs doigts pour calculer, nous avons voulu déterminer l'écart existant par sujet entre les performances obtenues lorsque les additions sont résolues avec les doigts et les performances obtenues lorsque les additions sont résolues sans les doigts. Pour cela, nous avons calculé la moyenne des enfants qui n'ont pas utilisé leurs doigts dans au moins 3 problèmes sur 12 (25%) et nous avons comparé le taux de bonnes réponses sur les deux catégories. On obtient 75 % de problèmes correctement résolus chez les enfants qui n'ont pas utilisé leurs doigts dans au moins 3 additions sur 12 et 74 % de problèmes correctement résolus chez les enfants qui utilisent leurs doigts pour calculer. Les enfants qui utilisent leurs doigts obtiennent donc des performances identiques lorsqu'ils utilisent ou n'utilisent pas leurs doigts pour calculer.

## 5. Utilisation des doigts pour calculer et performances dans la tâche de comptage verbal et dans la tâche de dénombrement

Une ANOVA avec le facteur inter utilisation des doigts pour calculer dans au moins une addition (i.e. "oui" vs "non") sur les scores obtenus à la tâche de comptage verbal a été réalisée. Les résultats de cette analyse montrent un effet significatif de l'utilisation des doigts pour calculer sur les scores de comptage verbal,  $F(1, 74) = 8.08, p < .001, \eta_p^2 = .11$ . Les enfants qui calculent sur leurs doigts obtiennent de meilleures performances en comptage verbal.

Une nouvelle ANOVA avec le facteur inter utilisation des doigts pour calculer dans au moins une addition (i.e. "oui" vs "non") sur les scores obtenus à la tâche de dénombrement a également été réalisée. On retrouve le même pattern de résultats c'est-à-dire un effet significatif de l'utilisation des doigts pour calculer sur les scores en dénombrement,  $F(1, 74) = 6.50, p = .01, \eta_p^2 = .08$ . Les enfants qui calculent sur leurs doigts sont aussi les enfants qui obtiennent de meilleures performances en dénombrement. En résumé, ces données montrent un lien entre l'utilisation des doigts pour calculer et les performances dans une tâche de comptage verbal. De même, ces données montrent un lien entre l'utilisation des doigts pour calculer et les performances dans une tâche de dénombrement.

Afin de savoir si l'utilisation des doigts pour calculer explique de manière spécifique la variabilité des performances en calcul ou la variabilité des performances en comptage verbal et en dénombrement, deux régressions multiples ont été réalisées. Dans un premier modèle, les scores obtenus en comptage verbal et en dénombrement sont introduits. Le modèle complet explique 13% de la variabilité des performances en arithmétique. Dans un deuxième modèle, la fréquence d'utilisation des doigts pour calculer est introduite. Le modèle complet explique 33% de la variabilité des performances en calcul. On constate dans ce modèle que seule l'utilisation des doigts pour calculer explique toujours de manière significative une part des performances en arithmétique ( $F = 17.80, p < .001, \eta_p^2 = .20$ ). Ainsi, ces données montrent que l'utilisation des doigts pour calculer explique de manière spécifique la variabilité des performances en calcul.

## 6. Type de stratégies et capacités en mémoire de travail

Dans cette partie, le type de stratégies que les enfants utilisent dans la tâche de calcul (i.e. "All", "First" et "Min") a été déterminé puis mis en lien avec les capacités en mémoire de travail des enfants (i.e. fortes ou faibles). Les stratégies ont été codées selon la description faite par

Baroody (1987) et décrite dans l'introduction. Nous nous sommes focalisés sur les stratégies utilisées dans les additions Min + Max, par exemple  $2 + 3$  ou  $3 + 5$ . En effet, la classification des stratégies en "All", "First" et "Min" ne prend de sens que pour les additions dont le plus petit des opérandes est en première position puisque lorsque le plus grand des deux opérandes est en première position, les stratégies "First" et "Min" sont identiques, au moins au niveau comportemental. La proportion des stratégies de calcul sur les doigts et le taux de réussite associé à chaque stratégie en fonction de la taille du problème (i.e. somme inférieure ou supérieure à 10) et des capacités en mémoire de travail des enfants sont reportés dans le tableau 7. Ce tableau décrit le comportement des 43 enfants utilisant au moins une fois leurs doigts pour calculer dans la tâche d'additions simples.

Tableau 7.

*Fréquence d'utilisation des stratégies et taux de réussite pour les problèmes Min + Max en fonction de la taille du problème et des capacités en mémoire de travail des 43 enfants qui utilisent au moins une fois leurs doigts pour calculer dans la tâche d'additions simples.*

<b>FAIBLES CAPACITES EN MdT</b>					
Toutes les additions					
	All	Min	First	Ø doigts	Indéterminable
Fréquence d'utilisation des doigts pour calculer	.33	.03	.23	.13	.28
Réussite	.48	1.00	.68	.53	.35
Problèmes < 10					
	All	Min	First	Ø doigts	Indéterminable
Fréquence d'utilisation des doigts pour calculer	.38	.04	.23	.14	.23
Réussite	.63	1.00	.83	.55	.39
Problèmes > 10					
Fréquence d'utilisation des doigts pour calculer	.25	0	.25	.10	.40
Réussite	0		.40	.50	.31
<b>FORTES CAPACITES EN MdT</b>					
Toutes les additions					
	All	Min	First	Ø doigts	Indéterminable
Fréquence d'utilisation des doigts pour calculer	.07	.14	.27	.26	.27
Réussite	1.00	.89	.68	.69	.51
Problèmes < 10					
	All	Min	First	Ø doigts	Indéterminable
Fréquence d'utilisation des doigts pour calculer	.08	.12	.23	.33	.25
Réussite	1.00	1.00	.90	.77	.61
Problèmes > 10					
Utilisation des doigts pour calculer	.04	.17	.35	.13	.30
Réussite	1.00	.75	.38	.33	.36

Pour les problèmes Min + Max avec une somme inférieure à 10, un test d'indépendance du  $\chi^2$  sur le nombre d'enfants qui utilisent une stratégie de comptage sur les doigts (i.e. "All", "First" ou "Min") et les capacités en mémoire de travail des enfants (i.e. fortes ou faibles) a révélé une dépendance entre ces deux variables,  $X^2(2) = 17.82, p < .001$  (cf. tableau 8). Lorsque la stratégie "All" est utilisée, elle est nettement plus souvent utilisée par les enfants avec de faibles capacités en mémoire de travail (38%) que par les enfants avec de fortes capacités en mémoire de travail (8%). Les enfants avec de fortes capacités en mémoire de travail réussissent en moyenne mieux les additions lorsque la stratégie "All" est utilisée que les enfants avec de faibles capacités en mémoire de travail ( $M = 100\%$  et  $M = 63\%$  respectivement). Les deux groupes d'enfants ne diffèrent pas quant à l'utilisation de la stratégie "First" (23%) mais les enfants avec de fortes capacités en mémoire de travail réussissent en moyenne mieux les additions quand cette stratégie est utilisée ( $M = 90\%$  et  $M = 83\%$  respectivement). Enfin, lorsque la stratégie "Min" est utilisée, elle est plus souvent utilisée par les enfants présentant de fortes capacités en mémoire de travail (12%) que les enfants avec de faibles capacités en mémoire de travail (4%). Toutefois, les deux groupes d'enfants réussissent en moyenne aussi bien les additions (100%).

Tableau 8.

*Nombre d'enfants qui utilisent une stratégie de calcul sur les doigts pour les problèmes Min + Max avec une somme inférieure à 10 en fonction des capacités en mémoire de travail des enfants (fortes ou faibles).*

	Stratégies de calcul sur les doigts		
	All	First	Min
Fortes capacités en WM	6	21	11
Faibles capacités en WM	30	18	3

Les mêmes analyses ont été conduites pour les problèmes Min + Max avec une somme supérieure à 10 (cf. tableau 9). La différence entre les enfants avec de fortes et de faibles capacités en mémoire de travail est également plus importante pour la stratégie "Min",  $X^2(2) = 14.18, p < .001$ . De même, lorsque la stratégie "All" est utilisée, elle est nettement plus souvent utilisée par les enfants avec de faibles capacités en mémoire de travail (25%) que par les enfants avec de fortes capacités en mémoire de travail (4%). Et, lorsque la stratégie "All" est utilisée, les enfants avec de fortes capacités en mémoire de travail réussissent en moyenne mieux les additions est utilisée que les enfants avec de faibles capacités en mémoire de travail ( $M = 100$  et  $M = 0$  respectivement).

Quant à la stratégie "First", elle est plus souvent utilisée par les enfants avec de faibles capacités en mémoire de travail (25%) que par les enfants avec de fortes capacités en mémoire de travail (35%).

Tableau 9.

*Nombre d'enfants qui utilisent une stratégie de calcul sur les doigts pour les problèmes Min + Max avec une somme supérieure à 10 en fonction des capacités en mémoire de travail des enfants (fortes ou faibles).*

	Stratégies de calcul sur les doigts		
	All	First	Min
Fortes capacités en WM	2	16	8
Faibles capacités en WM	10	10	0

## 7. Discussion

Cette recherche a tout d'abord été conduite dans le but de confirmer l'existence du lien entre gnose digitale et performances en arithmétique chez les jeunes enfants de 5 à 6 ans (Fayol et al., 1998 ; Noël, 2005), en s'assurant que ce lien ne soit pas dû à un facteur cognitif d'efficacité générale comme la mémoire de travail. Nos résultats confirment bien la relation entre la gnose digitale et les performances en arithmétique. Par contre, une fois que l'on contrôle l'effet de la mémoire de travail et de l'intelligence non verbale, la corrélation initiale entre la gnose digitale et les performances arithmétiques disparaît. Ces résultats suggèrent donc que la relation entre gnose digitale et performances arithmétiques est expliquée par un facteur plus général d'intelligence. Cette observation reste toutefois à interpréter avec précaution car nos résultats ne montrent pas de lien significatif entre les performances obtenues au test de lecture et les performances obtenues au test évaluant la gnose digitale. L'existence d'un effet spécifique de la gnose digitale sur les performances arithmétiques pourrait alors encore être envisagée.

Cette recherche a également été conduite afin de tester l'hypothèse fonctionnelle selon laquelle le comptage sur les doigts serait le médiateur de la relation entre gnose digitale et habiletés arithmétiques. Les données de ce travail ne nous ont pas permis de valider cette hypothèse puisque nous n'avons pas trouvé de corrélation entre la gnose digitale et l'utilisation des doigts pour calculer. En revanche, nous avons montré que les enfants qui utilisent leurs doigts

dans la tâche d'additions simples sont meilleurs même quand ils ne les utilisent pas que les enfants qui n'utilisent jamais leurs doigts pour calculer. Ce résultat suggère que la supériorité des enfants qui calculent sur leurs doigts ne vient pas de l'utilisation des doigts pour calculer en tant que telle mais plutôt d'une maîtrise plus profonde des connaissances conceptuelles sur les nombres qui se matérialise par la mise en œuvre de stratégies digitales. Ainsi, le lien entre gnose digitale et performances arithmétique ne serait pas médiatisé par l'utilisation des doigts pour calculer.

Ensuite, à partir des données de première année, nous avons montré que l'utilisation des doigts pour calculer est une bonne stratégie chez les jeunes enfants puisque les enfants qui calculent sur leurs doigts obtiennent de meilleures performances dans une tâche d'additions simples. Ces résultats confirment ceux obtenus par Jordan et al. (2008). Nos résultats ont également montré que ce sont les enfants avec de fortes capacités en mémoire de travail qui utilisent le plus leurs doigts pour calculer par rapport aux enfants avec de faibles capacités en mémoire de travail. Cette observation suggère que découvrir et mettre en place la stratégie de comptage sur les doigts dans une tâche de calcul nécessite la mobilisation de trop de ressources cognitives pour les enfants ayant une faible mémoire de travail. Par conséquent, les enfants avec de faibles capacités en mémoire de travail auraient plus de difficultés à mettre en place cette stratégie. Pour autant, cela ne veut pas dire que ces enfants n'utilisent jamais leurs doigts pour calculer. Effectivement, les enfants avec de faibles capacités en mémoire de travail utilisent leurs doigts pour calculer mais utilisent plus des stratégies rudimentaires et peu efficaces comme la stratégie "All" que les enfants avec de fortes capacités en mémoire de travail. Lorsque cette stratégie est utilisée, ils réussissent aussi en moyenne moins bien les additions que les enfants avec de fortes capacités en mémoire de travail. A l'inverse, les enfants avec de fortes capacités en mémoire de travail utilisent plus souvent des stratégies élaborées et efficaces comme la stratégie "Min" qui consiste à compter à partir du plus grand des deux opérandes et obtiennent de meilleures performances que les enfants avec de faibles capacités en mémoire de travail qui utilisent cette stratégie.

Dans l'ensemble, ces résultats obtenus lors de la première année de recherche montrent que les enfants qui calculent sur leurs doigts obtiennent de meilleures performances dans une tâche d'additions simples et correspondent également aux enfants avec de fortes capacités en mémoire de travail. Après avoir établi ce constat, nous avons voulu déterminer l'évolution du comportement des enfants qui calculent et qui ne calculent pas sur leurs doigts, tant au niveau de l'utilisation des doigts que des performances à la tâche de calcul. Nous avons voulu aussi dégager le profil des enfants concernant leurs capacités en mémoire de travail et le type de stratégie de calcul sur les

doigts qu'ils utilisent. Dans une démarche de recherche longitudinale, nous avons donc raisonné sur les données récoltées tout au long des trois années.

---

## Analyse longitudinale sur les trois années (6 à 8 ans)

---

Pour cette deuxième partie de résultats, les analyses portent sur les données récoltées lors des trois années de recherche. Les résultats sont donc présentés dans une démarche de recherche longitudinale. Les enfants de deuxième année (3P) étaient âgés en moyenne entre 6 et 7 ans (tranche d'âge de 74 mois (6; 2 mois) à 97 mois (7; 7 mois), moyenne d'âge: 85 mois (7; 1 mois), SD: 3, 42 mois). Quant aux enfants de troisième année (4P), ils étaient âgés en moyenne entre 7 et 8 ans (tranche d'âge de 85 mois (7; 1 mois) à 103 mois (8; 7 mois), moyenne d'âge: 96 mois (8 ans), SD: 3, 38 mois). Les enfants ont été une nouvelle fois évalués durant le second semestre de scolarité entre la fin du mois de Février et le milieu du mois de Juin lors de ces deux années consécutives.

Pour les analyses statistiques, nous avons utilisé l'empan en mémoire de travail des enfants de 6 ans en s'assurant qu'il corrèle avec l'empan en mémoire de travail des enfants de 8 ans ( $r = .35$ ,  $p = .002$ ), Nous avons également utilisé le score de gnosie digitale obtenu par les enfants de 6 ans car il corrèle avec celui obtenu par les enfants de 7 ans ( $r = .32$ ,  $p = .004$ ) et avec celui obtenu par les enfants de 8 ans ( $r = .38$ ,  $p < .001$ ).

### 1. Evolution du lien entre gnosie digitale et performances arithmétiques

Nous avons vu qu'en première année, la corrélation entre la gnosie digitale et le pourcentage de réussite à la tâche d'additions simples disparaît une fois que l'on contrôle la mémoire de travail et l'intelligence non verbale. En deuxième année, les résultats de l'analyse de corrélation effectuée entre le score de gnosie digitale et le taux de réussite à la tâche d'additions simples n'ont pas confirmé le lien entre ces deux variables ( $r = .07$ ,  $p = .54$ ). En troisième année, le même pattern de résultats est obtenu ( $r = .16$ ,  $p = .17$ ).

### 2. Evolution du lien entre capacités en mémoire de travail et performances arithmétiques

A 6 ans, nous avons montré qu'il existe un lien entre les capacités en mémoire de travail et les performances en calcul. Chez les enfants de 7 ans, on retrouve le même pattern de résultats c'est-à-dire que ces deux variables sont toujours liées positivement ( $r = .26$ ,  $p = .02$ ). Cette corrélation

reste aussi significative pour les grandes additions ( $r = .28, p = .01$ ) mais pas pour les petites additions ( $r = .072, p = .54$ ). Par contre, chez les enfants de 8 ans, le lien entre les capacités en mémoire de travail et les performances arithmétiques n'est plus significatif ( $r = .14, p = .22$ ) et ce, quelle que soit la taille du problème ( $r = .02, p = .88$  pour les petites additions et  $r = .14, p = .24$  pour les grandes additions respectivement).

### 3. Evolution du lien entre utilisation des doigts pour calculer et performances arithmétiques

#### a) Analyse corrélacionnelle

En première année, nous avons déjà vu que 43 enfants sur 76 calculent à l'aide des doigts et 33 enfants ne les utilisent pas. Les enfants qui calculent sur leurs doigts obtiennent en moyenne de meilleures performances à la tâche de calcul que les enfants qui ne les utilisent pas. A l'inverse, en deuxième année, seulement 14 enfants sur 76 n'utilisent pas leurs doigts pour calculer (cf. tableau 10). La corrélation entre la fréquence d'utilisation des doigts pour calculer en deuxième année et le pourcentage de réussite à la tâche d'additions en deuxième année n'est pas significative ( $r = -.13, p = .92$ ). La corrélation est non significative quelle que soit la taille du problème ( $r = -.021, p = .86$  pour les petites additions et  $r = .068, p = .56$  pour les grandes additions). A 7 ans, la relation entre utilisation pour calculer et performances arithmétiques n'est donc plus significative.

En troisième année, 42 enfants sur 76 utilisent encore leurs doigts pour calculer. La corrélation entre la fréquence d'utilisation des doigts pour calculer en troisième année et le pourcentage de réussite à la tâche d'additions en troisième année n'est pas significative ( $r = -.08, p = .51$ ) et ce, quelle que soit la taille du problème ( $r = -.18, p = .11$  pour les petites additions et  $r = -.01, p = .94$  pour les grandes additions). A 8 ans, la relation entre utilisation des doigts pour calculer et performances arithmétiques est donc également non significative.

Tableau 10.

Nombre d'enfants qui utilisent et qui n'utilisent pas leurs doigts pour calculer en fonction de l'année (T1, T2, T3)<sup>2</sup>.

	Année		
	T1	T2	T3
Utilisation des doigts pour calculer	43	62	42
Pas d'utilisation des doigts pour calculer	33	14	34

#### b) Analyse de la variance

Pour établir les trajectoires développementales des 43 enfants qui calculent avec leurs doigts et des 33 enfants qui ne calculent pas avec leurs doigts en première année, une ANOVA à mesures répétées sur le pourcentage de réussite dans la tâche d'additions avec le facteur within année (i.e. T1 vs T2 vs T3) et le facteur between utilisation au moins une fois des doigts pour calculer en première année (i.e. "oui" vs "non") a été réalisée. Les résultats ont montré un effet principal significatif de l'utilisation des doigts pour calculer,  $F(1, 74) = 29.68, p < .001, \eta_p^2 = .27$ . Indépendamment de l'année, les enfants qui utilisent leurs doigts pour calculer obtiennent de meilleures performances en calcul que ceux qui ne les utilisent pas. Les résultats ont également montré un effet principal de l'année,  $F(2, 148) = 195.04, p < .001, \eta_p^2 = .72$ . Les performances diffèrent de manière significative en fonction de l'année c'est-à-dire que les enfants obtiennent de meilleures performances dans la tâche de calcul au fur et à mesure des années. Enfin, les résultats ont montré un effet d'interaction entre l'année et l'utilisation des doigts pour calculer en première année,  $F(2, 148) = 18.08, p < .001, \eta_p^2 = .20$  (cf. figure 3). Afin d'explorer l'interaction, un test post hoc de Tukey a été appliqué pour comparer chaque moyenne de réussite deux à deux en fonction de l'année (i.e. T1 vs T2 vs T3) et du groupe (i.e. "oui" vs "non"). En première année, la différence entre les moyennes de réussite des deux groupes est significative ( $p < .001$ ). Les enfants qui calculent sur leurs doigts en première année obtiennent de meilleures performances ( $M = 58\%$ ) que ceux qui ne les utilisent pas ( $M = 23\%$ ). En deuxième année, la différence entre les moyennes de réussite des deux groupes est également significative ( $p = .02$ ). Les enfants qui calculent sur leurs doigts en deuxième année obtiennent de meilleures performances ( $M = 89\%$ )

<sup>2</sup> Les enfants qui calculent et qui ne calculent pas sur leurs doigts ne correspondent pas aux mêmes enfants en T1, T2 et T3

que ceux qui ne les utilisent pas ( $M = 75\%$ ). Par contre, en troisième année, la différence entre les moyennes de réussite des deux groupes d'enfants n'est pas significative ( $p = 1$ ). Le taux moyen de réussite est de 95% pour les deux groupes d'enfants. Cet effet plafond des performances explique probablement ce dernier résultat. Pour la suite des analyses, la moyenne du temps d'exécution par addition correctement résolue sur les douze additions a été calculée pour les enfants de troisième année et nous avons utilisé cette moyenne comme indice de performance à la tâche de calcul.

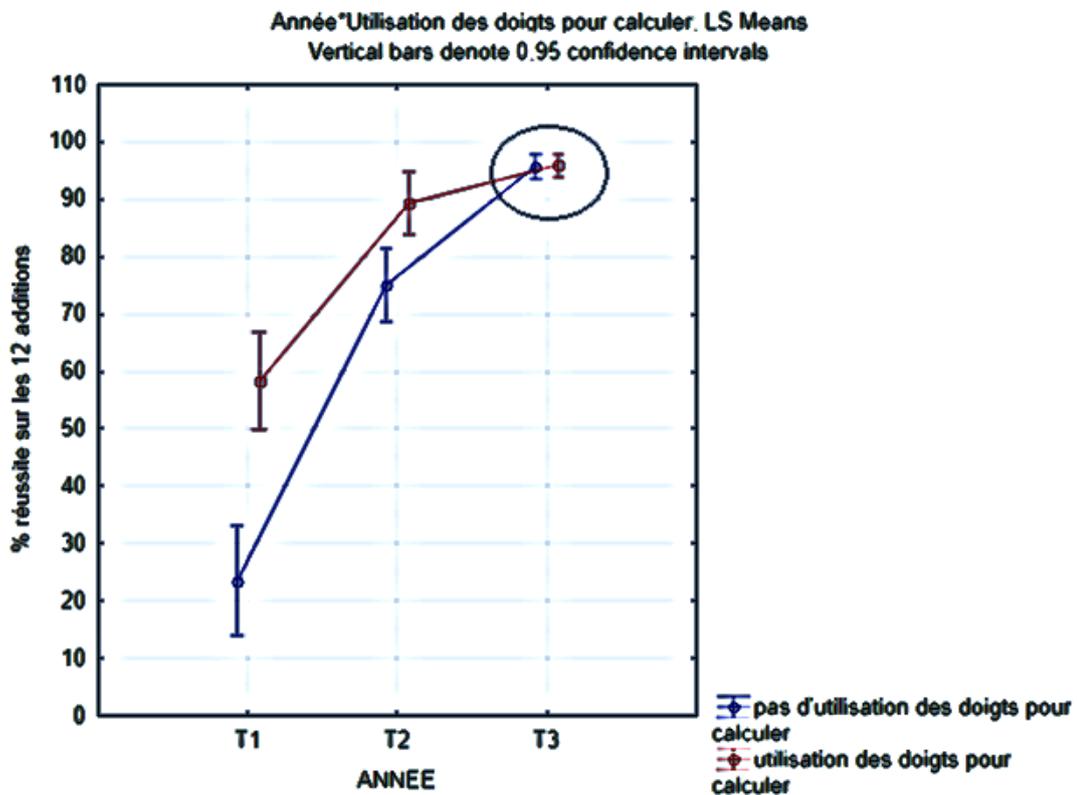


Figure 3. Pourcentage de réussite à la tâche d'additions simples en fonction de l'utilisation des doigts pour calculer pour les trois années (T1, T2 et T3).

c) Etablissement des profils

Comme mentionné précédemment, pour établir précisément les trajectoires développementales des enfants qui calculent et qui ne calculent pas sur leurs doigts en première année, nous avons considéré un groupe d'enfants de 6 ans qui calculent au moins une fois à l'aide des doigts et un groupe d'enfants du même âge qui n'utilisent pas leurs doigts dans les calculs. Nous avons ensuite

leur évolution tant au niveau de l'utilisation des doigts pour calculer que de leurs performances à la tâche de calcul sur les 3 années consécutives (cf. figure 4).

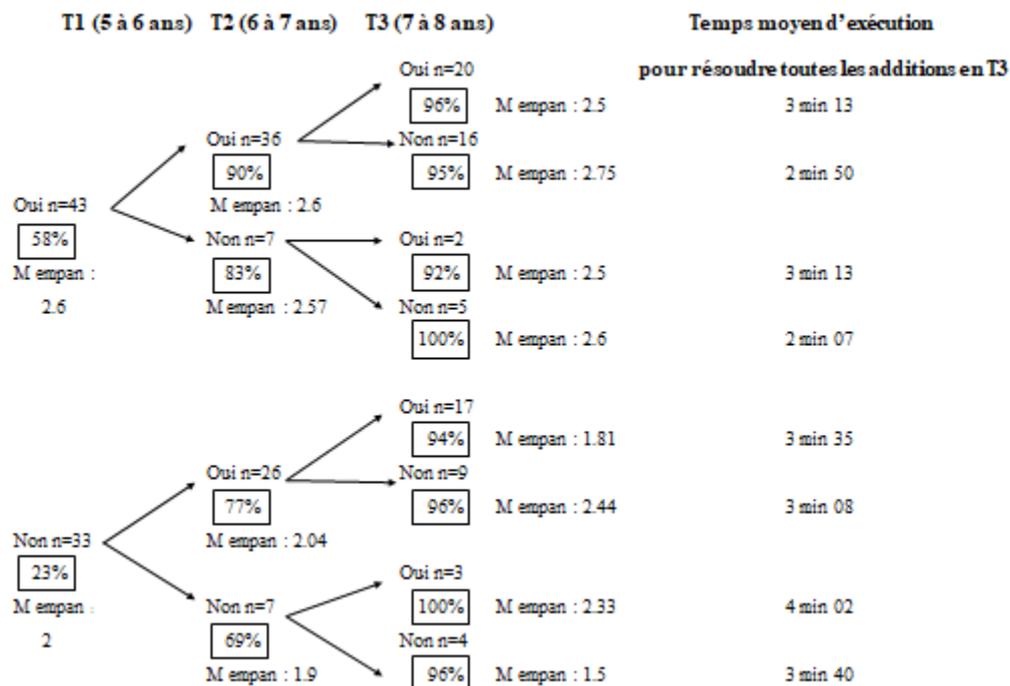


Figure 4. Trajectoires développementales des 43 enfants qui calculent sur leurs doigts et des 33 enfants qui ne calculent pas sur leurs doigts en T1 avec pourcentage de réussite à la tâche d'additions simples et moyenne de l'empan de mémoire de travail (en T1, T2 et T3) et temps moyen d'exécution lors de la résolution de toutes les additions en T3.

Comme nous venons de l'établir, les enfants qui calculent sur leurs doigts obtiennent en moyenne de meilleures performances à la tâche de calcul (.58) que les enfants qui ne les utilisent pas (.23). Les enfants qui continuent de calculer sur leurs doigts en deuxième année obtiennent également de meilleures performances (.90) que les enfants qui viennent de mettre en place la stratégie de comptage sur les doigts dans la tâche d'additions (.77). Par contre, en troisième année, on observe un effet plafond des performances pour tous les groupes d'enfants allant de 92% à 100%. Comme annoncé préalablement, pour chaque groupe d'enfants de troisième année, la moyenne du temps d'exécution par addition correctement résolue sur les 12 additions a été calculée (cf. figure 5) et nous avons utilisé cette moyenne comme indice de performances à la tâche de calcul.

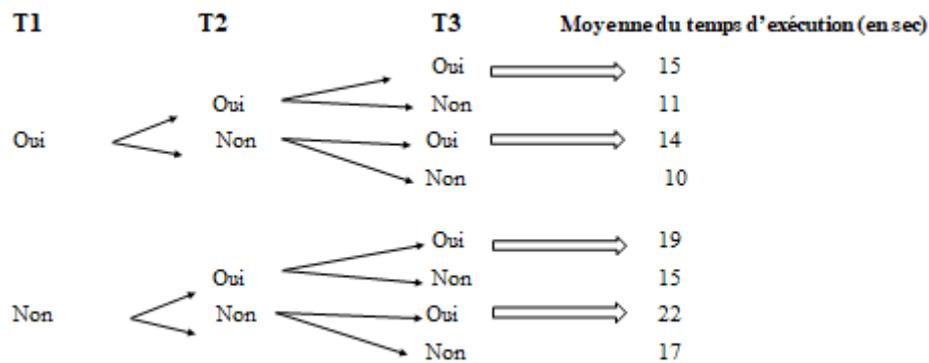


Figure 5 : Moyenne du temps d'exécution par addition correctement résolue sur les douze additions en T3.

On observe sur la figure 5 que les enfants qui calculent sur leurs doigts sont plus lents (entre 15 et 22 secondes) que ceux qui ne les utilisent pas (entre 10 et 17 secondes). Un test de Student a été réalisé pour comparer la moyenne du temps d'exécution entre les deux groupes d'enfants (i.e. "oui" vs "non") avec comme variable dépendante le temps d'exécution. Les résultats montrent que les enfants qui calculent avec leurs doigts sont bien plus lents que ceux qui ne les utilisent pas ( $M = 17.50$  et  $M = 13.25$  respectivement) mais la différence entre les moyennes des deux groupes n'est pas significative ( $t(6) = 1.75, p = .14$ ). En dernière année, il n'y aurait donc pas d'effet de l'utilisation des doigts pour calculer sur le temps d'exécution des 12 additions. En revanche, on peut tout de même penser qu'il existe une différence dans les temps d'exécution pour résoudre les petites additions et les grandes additions. En effet, lorsque la somme dépasse 10, il est possible que les enfants qui calculent sur leurs doigts mettent plus de temps pour trouver le résultat et il serait donc probable que les enfants soient plus rapides pour résoudre les petites additions que les grandes additions. Nous avons alors déterminé pour chaque groupe d'enfants la moyenne du temps d'exécution par addition correctement résolue sur les petites additions (cf. figure 6) et sur les grandes additions (cf. figure 7). Pour les grandes additions, les enfants qui calculent sur leurs doigts sont plus lents (entre 17 et 31 secondes) que ceux qui ne les utilisent pas (entre 11 et 17 secondes). A l'inverse, pour les additions inférieures à 10, les enfants qui n'utilisent pas leurs doigts pour calculer sont plus rapides (entre 8 et 15 secondes) que ceux qui ne les utilisent pas (entre 10 et 14 secondes).

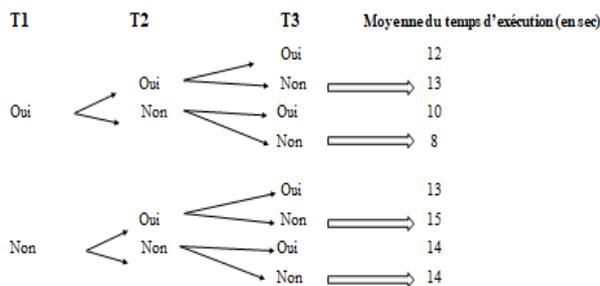


Figure 6 : Moyenne du temps d'exécution par addition correctement résolues sur les six petites additions en T3.

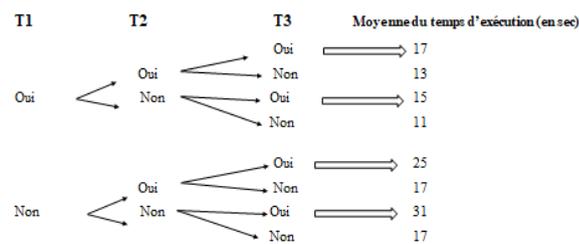


Figure 7 : Moyenne du temps d'exécution par addition correctement résolues sur les six grandes additions en T3.

Pour vérifier cette hypothèse statistiquement, une ANOVA factorielle a été réalisée avec comme variables indépendantes la taille des additions (i.e. <10 vs >10) et l'utilisation des doigts pour calculer (i.e. "oui" vs "non") et comme variable dépendante le temps d'exécution. Les résultats montrent un effet significatif de la taille des additions sur les temps d'exécution,  $F(1, 12) = 7.51$  ;  $p = .02$  ,  $\eta_p^2 = .38$ . Les petites additions sont résolues plus rapidement que les grandes additions ( $M = 12.38$  et  $M = 18.25$ , respectivement). Pour explorer précisément ce résultat, différents contrastes ont été effectués. Les résultats ne montrent pas d'effet significatif de l'utilisation des doigts pour calculer lors de la résolution des petites additions sur les temps d'exécution,  $F(1, 12) = .007$ ,  $p = .94$ ,  $\eta_p^2 = .00$ . Les enfants qui calculent avec leurs doigts pour résoudre les petites additions mettent en moyenne autant de temps que ceux qui ne les utilisent pas pour résoudre ces additions ( $M = 12.50$  et  $M = 12.50$ , respectivement). Par contre, lors de la résolution des grandes additions, les enfants qui calculent sur leurs doigts mettent significativement plus de temps pour résoudre ces additions que les enfants qui ne calculent pas sur leurs doigts ( $M = 22$  et  $M = 14.50$ , respectivement),  $F(1, 12) = 5.90$ ,  $p = .03$ ,  $\eta_p^2 = .33$ . Il est possible que les enfants qui calculent sur leurs doigts soient plus lents parce que l'utilisation de la stratégie de calcul sur les doigts est une procédure qui nécessite plus de temps que l'utilisation d'une stratégie plus internalisée. Ainsi, il est possible que plus les enfants utilisent leurs doigts pour calculer, plus ils mettent de temps pour résoudre les grandes additions. Nous avons alors déterminé la proportion d'utilisation des doigts lors de la résolution des grandes additions des enfants qui calculent sur leurs doigts en dernière année (cf. figure 8).

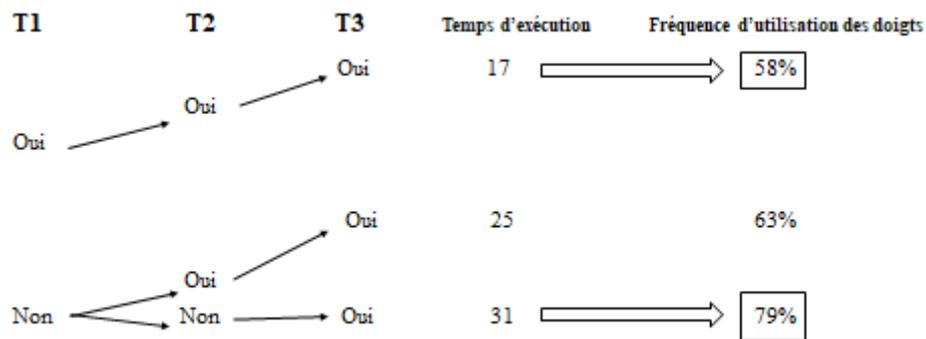


Figure 8 : Moyenne du temps d'exécution par addition obtenue sur les réponses correctes des six grandes additions et fréquence d'utilisation des doigts pour calculer des enfants qui calculent sur leurs doigts en troisième année.

Descriptivement, plus les enfants utilisent leurs doigts lors de la résolution des grandes additions, plus ils sont lents (.79 vs .58). Pour vérifier cette observation de manière statistique, une corrélation a été effectuée entre la fréquence d'utilisation des doigts pour résoudre les grandes additions et le temps d'exécution. Les résultats ne montrent pas de lien significatif entre ces deux variables ( $r = .06, p = .71$ ).

Nous venons d'établir que les enfants qui calculent sur leurs doigts en troisième année mettent plus de temps pour résoudre les grandes additions par rapport aux enfants qui ne calculent pas sur leurs doigts. Par conséquent, pour établir l'évolution de l'utilisation des doigts pour calculer et des performances en arithmétiques sur les trois années, les analyses seront effectuées en considérant la vitesse d'exécution comme indice de performances. Par contre, les analyses conduites pour établir l'évolution de l'utilisation des doigts pour calculer entre la première et la deuxième année porteront sur le taux de réussite des 12 additions.

d) Evolution de l'utilisation des doigts pour calculer et des performances arithmétiques en première et deuxième année

Une première ANOVA avec le facteur inter utilisation des doigts pour calculer (i.e. trajectoires "oui oui" vs "oui non" vs "non oui" vs "non non") sur le taux de réussite à la tâche d'additions simples en deuxième année a été réalisée. Les résultats de cette analyse montrent une différence significative entre les moyennes du taux de réussite à la tâche d'additions simples en deuxième année des quatre groupes,  $F(3, 72) = 4.40 ; p = .006, \eta_p^2 = .15$ . Pour déterminer précisément quel

groupe obtient de meilleures performances, nous avons effectué différents contrastes. Les résultats révèlent que les enfants qui ont mis en place le calcul sur les doigts en première année et qui continuent d'utiliser cette stratégie en deuxième année (i.e. trajectoire "oui oui") obtiennent significativement de meilleures performances en calcul en deuxième année (.90) que le groupe des enfants qui n'a jamais utilisé ses doigts pour calculer (.69) (i.e. trajectoire "non non"),  $t = 2.83, p = .006$ . Les résultats montrent également que les enfants qui ont mis en place le comptage sur les doigts dans la tâche de calcul en première année et qui continuent d'utiliser cette stratégie en deuxième année (i.e. trajectoire "oui oui") obtiennent significativement de meilleures performances en calcul (.90) que les enfants ayant mis en place la stratégie uniquement en deuxième année (.77) (i.e. trajectoire "non oui"),  $t = 2.94, p = .004$ .

- e) Effet de l'utilisation des doigts pour calculer en première année sur les performances arithmétiques en dernière année

Une ANOVA avec le facteur inter utilisation des doigts pour calculer dans au moins une des grandes additions en première année (i.e. "oui" vs "non") sur le temps d'exécution des grandes additions en dernière année a été réalisée. De manière intéressante, les résultats montrent un effet significatif de l'utilisation des doigts pour calculer en première année sur le temps d'exécution des grandes additions en dernière année,  $F(1, 34) = 5.69 ; p = .02, \eta_p^2 = .14$ . Les enfants qui ont commencé à calculer sur leurs doigts en première année sont en moyenne plus rapides ( $M = 12.26$  secondes) pour résoudre les grandes additions en dernière année que les enfants qui ne calculent pas sur leurs doigts sur leurs doigts en première année ( $M = 16.41$  secondes).

Afin de déterminer si les enfants qui calculent sur leurs doigts en première année et qui continuent d'utiliser leurs doigts en dernière année sont plus rapides que les enfants qui ont abandonné cette stratégie en dernière année, un test de Student a été réalisé. Les résultats montrent que les enfants qui ont commencé à calculer sur leurs doigts en première année et qui continuent de calculer sur leurs doigts en dernière année sont moins rapides ( $M = 17.50$  secondes) que les enfants qui ont abandonné leurs doigts pour résoudre les grandes additions en troisième année ( $M = 13.25$  secondes),  $t(32) = 2.79, p = .009$ .

#### f) Analyse descriptive des trajectoires développementales

Une analyse descriptive de l'évolution des profils des enfants qui calculent et qui ne calculent pas sur leurs doigts lors de la résolution des additions est présentée ici. Des tests statistiques n'ont pas pu être effectué en raison de la faible taille d'échantillon de certains groupes. Les trajectoires développementales "Oui oui oui", "Oui non non", "Non non non" et "Non oui oui" ont particulièrement retenu notre attention (cf. figure 9). On observe que les enfants qui utilisent toujours leurs doigts pour calculer (i.e. trajectoire "oui oui oui") sont nettement plus rapides pour résoudre les additions en troisième année que les enfants qui ont mis en place la stratégie de calcul sur les doigts en deuxième année et qui continue de l'utiliser en dernière année (i.e. trajectoire "non oui oui") (i.e. 17 secondes vs 25 secondes, respectivement). Les enfants qui utilisent toujours leurs doigts pour calculer ont aussi de plus fortes capacités en mémoire de travail (i.e. empan moyen de 2.5) par rapport à l'autre groupe d'enfants (i.e. empan moyen de 1.81). Quant aux enfants qui ont abandonné leurs doigts pour calculer en deuxième année (i.e. trajectoire "oui non non"), ils sont plus rapides pour résoudre les additions en troisième année (i.e. 11 secondes) que les enfants qui n'ont jamais utilisé leurs doigts pour calculer (i.e. 17 secondes) (i.e. trajectoire "non non non"). On constate également que les enfants qui abandonnent leurs doigts dans la tâche de calcul en deuxième année sont également les enfants avec de plus fortes capacités en mémoire de travail (i.e. empan moyen de 2.6) par rapport aux enfants qui n'ont jamais utilisé leurs doigts pour calculer (i.e. empan moyen de 1.5).

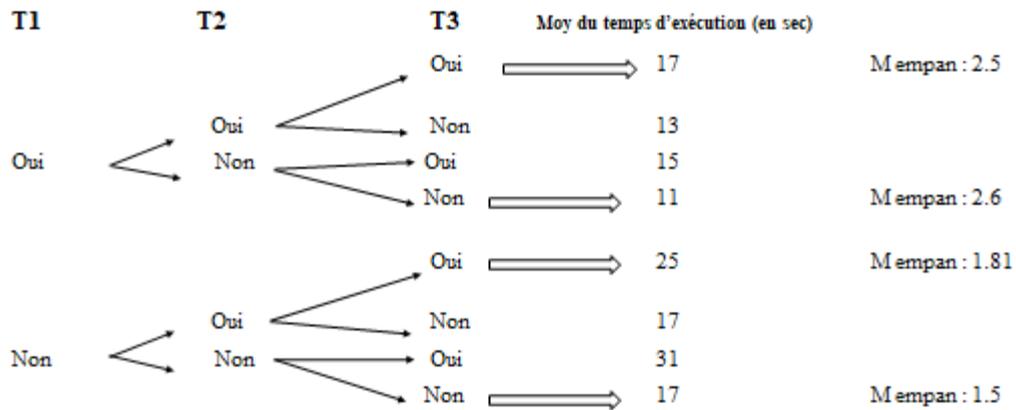


Figure 9. Moyenne du temps d'exécution par addition correctement résolue avec moyenne de l'empan en mémoire de travail des enfants en T3 en fonction de la trajectoire développementale ("Oui oui oui", "Oui non non", "Non non non" et "Non oui oui").

#### 4. Evolution des stratégies

Le taux moyen d'utilisation de chaque stratégie pour les additions Min + Max en fonction de l'année et de l'utilisation des doigts pour calculer a été déterminé. Le taux moyen d'utilisation de chaque stratégie en T-1 a également été déterminé (cf. figure 10). Cette analyse porte sur 64 enfants car 12 des 76 enfants n'ont pas utilisé leurs doigts pour calculer dans les additions de type Min + Max en première, deuxième ou troisième année.

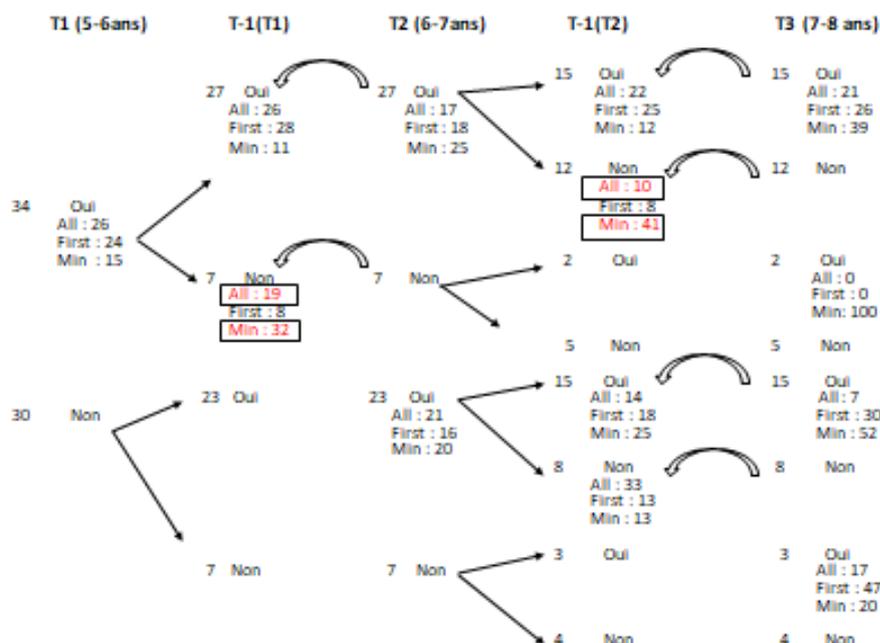


Figure 10. Taux moyen d'utilisation des types de stratégies en fonction de l'année et de l'utilisation des doigts pour calculer pour les problèmes Min + Max.

Pour les problèmes Min + Max, les enfants qui se sont déjà extraits de leurs doigts pour calculer à l'âge de 7 ans sont les enfants qui utilisent le moins la stratégie "All" (.19) et le plus la stratégie "Min" (.32) l'année précédente. De même, les enfants qui se sont extraits de leurs doigts pour calculer à 8 ans sont les enfants qui utilisent le moins la stratégie "All" (.10) et le plus la stratégie "Min" (.41) l'année précédente (cf. figure 10).

Nous nous sommes ensuite particulièrement intéressés à l'utilisation de la stratégie "All" lors de la résolution de toutes les additions (cf. tableau 11). En première année, seulement 4 enfants sur les 43 enfants qui utilisent au moins une fois leurs doigts pour calculer ont utilisé la stratégie "All" pour résoudre tous les problèmes. En deuxième année, 9 sur les 26 enfants qui ont commencé à utiliser leurs doigts pour calculer ont directement commencé à utiliser des stratégies élaborées "Count on". Enfin, sur les 3 enfants de troisième année qui ont commencé à utiliser leurs doigts dans la tâche d'additions, 2 d'entre eux n'ont jamais utilisé la stratégie "All". Notons ici que l'enfant qui a utilisé ses doigts pour calculer a utilisé la stratégie "All" seulement pour une addition. Ainsi, ces résultats montrent que la stratégie "All" n'est pas inévitablement la première stratégie mise en place par les enfants lorsqu'ils commencent à calculer sur leurs doigts.

Tableau 11.

*Nombre d'enfants qui utilisent la stratégie "All" en fonction de l'année où ils commencent à calculer sur leurs doigts (T1, T2 et T3).*

	Nombre d'enfants qui commencent à calculer sur ses doigts	Utilisation de la stratégie "All" au moins une fois	Utilisation de la stratégie "All" pour tous les problèmes
T1	43	23	4
T2	26	16	0
T3	3	1	0

## 5. Discussion

Dans une démarche de recherche longitudinale, nous avons déterminé l'évolution du comportement des enfants tant au niveau de l'utilisation des doigts pour calculer que des performances en arithmétique. Nos résultats montrent que les enfants qui calculent sur leurs doigts en première et en deuxième année continuent d'obtenir de meilleures performances dans la tâche d'additions simples que les enfants qui ne les utilisent pas. Ce résultat confirme les observations de Jordan et al. (2008). En troisième année, on observe un effet plafond des pourcentages de réussite (de 92 % à 100 %). Nous avons alors considéré la vitesse d'exécution des opérations comme indice de performances. Nos résultats montrent que les enfants qui calculent sur leurs doigts en troisième année mettent plus de temps pour résoudre les grandes additions que les enfants qui ne calculent pas sur leurs doigts en troisième année. Ce résultat va alors aussi dans le sens des observations de Jordan et al. (2008).

De plus, nos résultats suggèrent que calculer sur ses doigts en première et deuxième année est un meilleur profil pour réussir les additions en deuxième année par rapport à celui de ne jamais calculer sur ses doigts. Effectivement, les enfants qui ont mis en place le calcul sur les doigts en première année et qui continuent d'utiliser cette stratégie en deuxième année obtiennent significativement de meilleures performances en calcul en deuxième année que le groupe des enfants qui n'a jamais utilisé ses doigts pour calculer. Nos résultats suggèrent également que calculer sur ses doigts les deux premières années est un meilleur profil que celui de calculer sur ses doigts à partir de la deuxième année seulement. En effet, les enfants qui ont mis en place le

comptage sur les doigts dans la tâche de calcul en première année et qui continuent d'utiliser cette stratégie en deuxième année obtiennent significativement de meilleures performances en calcul en deuxième année que les enfants ayant mis en place la stratégie uniquement en deuxième année. Ainsi, ces données soutiennent l'existence d'un lien entre l'utilisation des doigts pour calculer vers l'âge de 6 ans et les performances arithmétiques vers l'âge de 7 ans.

En outre, nos résultats suggèrent que calculer sur ses doigts vers l'âge de 6 ans et abandonner cette stratégie vers l'âge de 8 ans est un bon profil pour réussir les additions. En effet, les enfants qui ont commencé à calculer sur leurs doigts en première année et qui continuent de calculer sur leurs doigts en dernière année sont moins rapides pour résoudre les additions en dernière année que les enfants qui ont abandonné leurs doigts pour résoudre les additions en troisième année. Ainsi, ces données montrent l'existence d'un lien entre l'utilisation des doigts pour calculer vers l'âge de 6 ans et les performances arithmétiques vers l'âge de 8 ans.

Enfin, notre étude suggère que calculer sur ses doigts à 6, 7 et 8 ans est un bon profil pour réussir les additions à 8 ans. Mais il semble exister un meilleur profil, qui est celui de calculer sur ses doigts vers l'âge de 6 ans et d'abandonner cette stratégie vers l'âge de 7 ans. En effet, les enfants qui ont abandonné leurs doigts pour calculer en deuxième année sont plus rapides pour résoudre les additions en troisième année que les enfants qui n'ont jamais utilisé leurs doigts pour calculer. De manière intéressante, les enfants qui correspondent à ce profil sont les enfants avec les plus fortes capacités en mémoire de travail. A l'inverse, les enfants qui ont mis en place la stratégie de calcul sur les doigts plus tardivement ou qui n'ont jamais utilisé leurs doigts pour calculer sont les enfants avec les plus faibles capacités en mémoire de travail.

L'évolution de l'utilisation des doigts pour calculer a finalement retenu notre attention. Nos résultats suggèrent que les enfants qui utilisent leurs doigts pour calculer et qui s'en dégagent le plus précocement sont les enfants qui utilisent le plus la stratégie évoluée l'année précédente, c'est-à-dire la stratégie "Min" et le moins la stratégie rudimentaire, c'est-à-dire la stratégie "All" l'année précédente. Cette observation corrobore la proposition de Barrody (1987), selon laquelle les enfants utilisent des stratégies de calcul sur les doigts rudimentaires et peu efficaces puis ces stratégies sont peu à peu remplacées par des stratégies plus efficaces. Ensuite, l'utilisation des stratégies sophistiquées permettrait aux enfants de s'affranchir de leurs doigts pour effectuer les calculs de manière plus internalisée. Par ailleurs, nos résultats montrent que les enfants n'utilisent pas inévitablement la stratégie "All" dès qu'ils commencent à calculer sur leurs doigts. En effet, nos résultats montrent qu'en première année, seulement 4 enfants sur les 43 enfants qui utilisent au moins une fois leurs doigts pour calculer ont utilisé la stratégie "All" pour résoudre tous les

problèmes. En deuxième année, 9 sur les 26 enfants qui ont commencé à utiliser leurs doigts pour calculer ont directement commencé à utiliser des stratégies "Count on". Et enfin, sur les 3 enfants de troisième année qui ont commencé à utiliser leurs doigts dans la tâche d'additions, 2 d'entre eux n'ont jamais utilisé la stratégie "All" pour résoudre les additions. Cette observation corrobore celle de Siegler (1996) selon laquelle le choix de la stratégie serait adaptatif, dans le sens où les individus tendent à utiliser la stratégie la plus efficace et la moins coûteuse pour un problème donné.



# Partie 3

## **Discussion générale**



Les données récoltées au cours des dernières années ont considérablement compliqué la conception relative au lien entre gnosie digitale et performances arithmétiques. Initialement, les associations relevées dans les pathologies adultes avaient conduit à envisager une relation forte entre les gnosies digitales et les performances arithmétiques (Gerstmann, 1940). Les données recueillies auprès de jeunes enfants avaient également fortement conforté cette hypothèse (Fayol et al., 1998 ; Marinthe et al., 2001), tout comme les études en imagerie cérébrale (Di Luca et al., 2006 ; Sandrini & Rusconi, 2009). Les recherches récentes ont toutefois conduit à nuancer cette conception initiale. Premièrement, les données issues des études portant sur des enfants n'ont que partiellement confirmé les associations entre faiblesse des gnosies digitales et faiblesse des performances arithmétiques (Long et al., 2016). Notamment des troubles moteurs affectant les gnosies digitales ne conduisent pas systématiquement à des troubles en arithmétique (Thevenot et al., 2014). Deuxièmement, les recherches introduisant des entraînements à des gnosies digitales ont montré une amélioration des performances arithmétiques (Gracia-Baffaluy & Noël, 2008), mais la validité de cette conclusion a été questionnée par d'éventuels phénomènes de régression vers la moyenne (voir la critique de Fischer, 2010). De plus, les études longitudinales ont confirmé l'existence d'une corrélation entre les gnosies digitales et les performances arithmétiques, à court comme à moyen terme (Fayol et al., 1998 ; Marinthe et al., 2001), mais les corrélations restent modestes et portent sur des groupes d'enfants d'âges différents (5-6 ans ; 6-7 ans ; 8-11 ans) suivis pendant des durées variables (quelques mois, plusieurs années). Enfin, les études de cas comme les recherches de corrélations montrent un lien entre les performances à des épreuves de gnosie digitale et les résultats à des tâches arithmétiques, mais aucun pattern précis des tâches arithmétiques qui devraient corrélérer ou non avec les gnosies digitales n'a encore été clairement identifié (opérations, résolution de problèmes, etc.). Les résultats de notre recherche confirment la relation entre les performances à une épreuve de gnosie digitale et les résultats à une tâche d'additions simples chez des enfants âgés en moyenne de 6 ans, mais cette corrélation disparaît quand on contrôle les effets de la mémoire de travail et de l'intelligence non verbale sur cette relation. Cette observation corrobore celle de Newman (2016) qui avait montré que les capacités cognitives générales et notamment la mémoire à court terme, permettent de prédire les performances arithmétiques. En revanche, Costa et al. (2011) avaient établi le lien entre la gnosie digitale et les performances arithmétiques une fois les effets contrôlés de la mémoire de travail et de l'intelligence non verbale sur la relation initiale. Une explication possible à cette observation pourrait être l'âge des enfants. Costa et al. (2011) ont mis en évidence ce lien chez des enfants âgés de 8 à 11 ans alors que les enfants de notre recherche sont âgés de 6 à 8 ans. De même,

Newman (2016) a montré que l'impact de la gnose digitale sur les performances arithmétiques varie en fonction de l'âge. La corrélation entre gnose digitale et performances en arithmétique existe seulement chez les enfants plus âgés, c'est-à-dire entre 9 et 12 ans mais pas chez les enfants de 5 à 8 ans. Dans ce cas, il serait possible que les gnosies digitales des enfants de notre recherche soient encore en train de se développer et que ces enfants soient donc trop jeunes pour que leurs performances à des épreuves testant les gnosies digitales influent sur leurs performances à des épreuves évaluant leurs capacités arithmétiques. Une autre interprétation possible à ce résultat serait qu'entre 6 et 8 ans, la mémoire de travail est moins développée chez ces jeunes enfants que chez les enfants plus âgés. Or, la tâche de gnose digitale et la tâche d'additions demandent beaucoup de ressources cognitives. Pour les réussir, il faudrait donc de grandes ressources en mémoire de travail. C'est pourquoi on observerait un lien entre ces trois variables (i.e. mémoire de travail, gnose digitale et performances arithmétiques) mais une fois que l'on contrôle les effets de la mémoire de travail sur la relation gnose digitale et performances arithmétiques, le lien entre la gnose digitale et les performances arithmétiques disparaît. A l'inverse, chez les enfants âgés de 8 à 11 ans, la mémoire de travail est plus développée. Ces enfants auraient donc plus de ressources disponibles en mémoire de travail pour faire appel à d'autres habiletés, comme la gnose digitale, pour effectuer des tâches arithmétiques. C'est pourquoi, chez les enfants plus âgés, le lien entre gnose digitale et performances arithmétiques persisterait une fois que l'on contrôle les effets de la mémoire de travail sur cette relation. Enfin, les différences de méthodologie pourraient aussi probablement expliquer les différences obtenues entre les résultats de notre recherche et ceux de la littérature. Il est en effet intéressant de se demander dans quel type de tâche et dans quelles circonstances les gnosies digitales influent sur les performances arithmétiques des enfants. Dans la tâche évaluant les gnosies digitales de l'étude de Fayol et al. (1998), l'expérimentateur attribuait un numéro, de 1 à 5, à chaque doigt de la main droite de l'enfant, en commençant par le pouce. L'enfant fermait les yeux et l'expérimentateur lui touchait les doigts un par un dans la séquence "3-1-5-4-2". L'enfant devait ensuite identifier chaque doigt touché en indiquant le numéro associé. En utilisant cette procédure, on constate qu'une composante de la mémoire de travail est intégrée dans la tâche de gnose digitale puisque l'enfant doit se souvenir de l'ordre de la séquence pour pouvoir répondre, ce qui implique une charge cognitive mémorielle. Il serait alors possible que le lien entre gnose digitale et performances arithmétiques soit en fait dû aux capacités cognitives des enfants. Or, contrairement à notre étude, ces auteurs n'ont pas testé les effets de la mémoire de travail sur le lien entre la gnose digitale et les performances arithmétiques. En résumé, d'autres variables supplémentaires à la gnose digitale semblent importantes dans la détermination des

performances arithmétiques. Ces variables peuvent être de nature numérique, comme le dénombrement ou la comparaison de nombres (Long et al., 2017), développementales (Newman, 2016) et aussi de nature cognitive comme les habiletés langagières (Newman, 2016) et les capacités en mémoire de travail. Il reste toutefois à noter ici que notre résultat, selon lequel la corrélation entre gnosie digitale et performances arithmétiques est expliquée en partie par un facteur plus général d'intelligence, reste à interpréter avec précaution car la gnosie digitale n'est pas en lien avec le niveau de lecture des enfants. A l'appui de cette observation, Noël (2005) et Marinthe et al. (2001) ont observé que les tests neuropsychologiques et notamment les tâches arithmétiques, ne prédisent pas les niveaux d'effcience atteint en lecture et en écriture chez les jeunes enfants. Ainsi, il semblerait qu'il existe encore un petit caractère spécifique du lien entre gnosie digitale et performances arithmétiques même quand on contrôle les effets des habiletés plus générales d'intelligence sur cette relation.

Plus généralement, très peu d'études ont abordé la question des raisons qui seraient susceptibles d'expliquer la relation entre les gnosies digitales et les performances arithmétiques. La thèse que nous avons présentée initialement dans ce travail considère le comptage sur les doigts comme principal médiateur de la relation entre gnosie digitale et performances arithmétiques mais nos résultats n'ont pas validé cette hypothèse. Selon Penner-Wilger (Penner-Wilger & Anderson, 2013 ; Penner-Wilger, 2008), il y aurait bien une relation entre gnosie digitale et compétences numériques mais aucun médiateur fonctionnel n'est nécessaire à son établissement. Plus précisément, cet auteur défend l'idée d'un redéploiement massif des circuits neuronaux c'est-à-dire que les zones du cerveau originellement dévolues à la représentation digitale se sont redéployées au fur et à mesure de l'évolution pour assurer la représentation des nombres et sont donc à présent spécialisées à la fois pour le traitement des nombres et des doigts. A notre connaissance, les auteurs n'ont pas encore validé à ce jour leur hypothèse mais planifient de tester des enfants avec des troubles du développement de la coordination qui ont des problèmes de dextérité sans pour autant avoir une gnosie digitale altérée (Penner-Wilger & Anderson, 2013). Nos résultats ne nous permettent pas de conclure qu'aucun médiateur n'est nécessaire à l'établissement de la relation entre gnosie digitale et performances arithmétiques. En revanche, les données dont nous disposons nous permettent de mieux comprendre pourquoi le comptage sur les doigts n'est pas le médiateur de la relation entre gnosie digitale et performances arithmétiques. En effet, les enfants qui utilisent leurs doigts dans la tâche d'additions simples sont meilleurs, même lorsqu'ils ne les utilisent pas, que les enfants qui n'utilisent jamais leurs doigts pour calculer. De plus, les enfants qui utilisent leurs doigts pour calculer obtiennent en moyenne d'aussi bonnes

performances lorsqu'ils utilisent ou n'utilisent pas leurs doigts pour résoudre les additions. Ceci suggère que le comptage sur les doigts n'est pas la cause de la réussite en calcul mais plutôt la manifestation d'une maîtrise plus profonde des connaissances conceptuelles sur le nombre qui se matérialise par la mise en place d'habiletés procédurales, ici les stratégies digitales. On entend par connaissances conceptuelles la compréhension qu'à l'enfant des principes qui gouvernent l'arithmétique, et des relations entre les diverses connaissances dont il dispose dans ce domaine. En fait, selon Halford (1993), il serait impossible de véritablement développer le concept de nombre sans avoir d'abord acquis les processus de quantification et notamment celui de dénombrement. Et de manière intéressante, nous avons également montré que les enfants qui calculent sur leurs doigts obtiennent de meilleures performances dans les tâches de comptage verbal et de dénombrement. Concernant les additions simples, les jeunes enfants apprennent à additionner avant d'entrer à l'école (Fuson, 1982). Les habiletés qu'ils développent nécessitent de comprendre préalablement qu'ajouter des objets accroît la quantité, que chaque nombre doit être représenté une fois et une seule mais aussi que l'ordre dans lequel est effectué l'addition n'a pas d'importance. C'est ce qu'on appelle le principe de commutativité. Très tôt, les enfants semblent donc comprendre les effets qualitatifs de l'addition. De nombreuses recherches ont étudié les relations entre les connaissances concernant l'addition et l'utilisation de la stratégie "Min" qui s'appuie sur le principe de commutativité. Par exemple, Baroody et Gannon (1984) ainsi que Cowan et Renton (1996) ont étudié cette relation chez des enfants d'école maternelle. Pour évaluer la compréhension du principe de commutativité, les auteurs ont présenté rapidement aux enfants des paires d'opérations telles que  $2+4$  et  $4+2$  et leur ont demandé, sans calcul, si ces opérations conduisent à des résultats identiques. Ou encore, après que l'enfant a effectué  $6+4$ , il lui est demandé, toujours sans calcul, si  $4+6$  conduit au même résultat. Dans les deux études, les enfants qui réussissent les tâches de commutativité s'avèrent être de plus fréquents utilisateurs de la stratégie "Min" que les enfants qui les échouent. Les mêmes auteurs observaient également que les enfants comprennent le principe de commutativité avant d'utiliser la stratégie "Min". Siegler et Crowley (1994) ont quant à eux demandé à des enfants de 5 ans d'évaluer de nouvelles procédures conformes ou non aux principes de l'addition. Il s'agissait de la stratégie "All", de la stratégie "Min", et une procédure incorrecte dans laquelle un des deux opérandes est représenté deux fois. Leurs résultats ont montré que les enfants qui n'utilisaient pas encore la stratégie "Min" la jugeaient cependant aussi correcte que la procédure "All", et rejetaient la procédure incorrecte. Ceci montre que les enfants comprennent les principes qui régissent l'addition avant de développer les procédures algorithmiques correspondantes. D'ailleurs, dans notre étude, les enfants qui

n'utilisent jamais leurs doigts dans la tâche d'additions simples échouent presque dans la moitié des cas pour résoudre les additions les plus simples comme  $2+1$  alors que les enfants qui utilisent leurs doigts, même lorsqu'ils ne les utilisent pas, réussissent presque toujours cette opération (93%). Cet exemple illustre les connaissances conceptuelles sur les nombres lacunaires des enfants qui n'utilisent jamais leurs doigts pour calculer et explique leurs difficultés à mettre en place des stratégies digitales. En résumé, ces études suggèrent que la découverte par les jeunes enfants des procédures algorithmiques pour les additions simples est déterminée par leurs connaissances conceptuelles sur les nombres. Bien que l'ensemble des habiletés construites à partir de 4 ans découle des activités de dénombrement du jeune enfant, le passage du dénombrement à l'arithmétique ne se résume pas au réinvestissement de procédures de comptage dans des situations qui requièrent la résolution d'opérations. Cette transition nécessite, ou tout au moins est facilitée par, la compréhension des concepts sous-jacents aux opérations élémentaires et aux nombres qu'elles impliquent. A l'appui de cette interprétation, les enfants de notre étude qui n'utilisent jamais leurs doigts dans la tâche d'additions simples échouent presque dans la moitié des cas pour résoudre les additions les plus simples comme  $2+1$  alors que les enfants qui utilisent leurs doigts, même lorsqu'ils ne les utilisent pas, réussissent presque toujours cette opération (93%). Cet exemple illustre les connaissances conceptuelles sur les nombres lacunaires des enfants qui n'utilisent jamais leurs doigts pour calculer et explique leurs difficultés à mettre en place des stratégies digitales.

Il reste à envisager également la possibilité que les enfants de notre étude qui utilisent les doigts aient déjà abandonné les stratégies digitales pour les additions où ils s'avéraient ne pas les utiliser, ce qui pourrait également expliquer leur supériorité sur les non utilisateurs quelque soit le type d'addition, et pourquoi le comptage sur les doigts ne médiatise pas la relation entre la gnose digitale et les performances arithmétiques. En effet, comme mentionné précédemment, les enfants apprennent à additionner avant d'entrer à l'école et ils pourraient donc s'extraire de la stratégie de comptage sur les doigts dès la première année de scolarité. Nos données ne permettent pas de répondre à cette hypothèse puisque les enfants n'ont pas été testés en première année de maternelle. Par contre, pour le vérifier, il serait pertinent, dans une étude ultérieure, d'étudier les performances arithmétiques d'enfants âgés de 3 à 4 ans sur des petits problèmes et d'observer s'ils utilisent ou s'ils n'utilisent pas leurs doigts pour résoudre les problèmes. De plus, il est également possible que d'autres facteurs que le comptage sur les doigts puissent médiatiser la relation entre gnose digitale et performances arithmétiques.

En effet, l'utilisation des doigts joue non seulement un rôle pour réaliser des calculs mais aussi pour communiquer les quantités à autrui. Ce sont les doigts "montreurs" selon l'expression de Di Luca et Pesenti (2008). Ils permettraient de montrer des quantités au moyen de configurations manuelles qui peuvent être différentes de celles utilisées pour calculer. Par exemple, lever 3 doigts pour représenter 3 quantités. En fait, Brissiaud (1991) mentionne qu'au cours du développement, les doigts peuvent rapidement être utilisés comme collections-témoins privilégiées pour représenter les nombres de manière visuelle. Les collections-témoins de doigts ne sont pas produites au hasard mais suivent des configurations typiques auxquelles les enfants sont exposés. Par exemple, en Occident, deux mains pour représenter *dix*, une main avec tous les doigts levés pour représenter *cinq* et le pouce et l'index pour représenter *deux*. Ces configurations canoniques représentant les nombres sur les doigts ont donc un double statut puisqu'elles ont à la fois un statut symbolique, précisément conféré par leur dimension canonique et attestée par le fait qu'elles sont reconnues bien plus rapidement que des configurations aléatoires, mais ces configurations restent aussi non-symboliques puisqu'elles portent en elles le cardinal de la collection représentée (Andres et al., 2008 ; Lafay et al., 2013). Di Luca et al. (2006) ont fait passer à des adultes une épreuve de mise en correspondance entre des chiffres arabes et des configurations de doigts et ont montré que les participants commettaient moins d'erreurs lorsque l'appariement respectait leurs associations personnelles. Les configurations canoniques de doigts permettraient donc une reconnaissance et une évaluation plus exactes des quantités que les représentations digitales non canoniques. Au cours du développement, comme les enfants apprennent à représenter et à montrer les quantités sur les doigts en fonction de leur culture, il serait possible que ce soit une meilleure gnose digitale qui permette une représentation et une reconnaissance plus précise des nombres sur les doigts, facilitant en retour les premiers apprentissages numériques. En tout cas, actuellement, aucune donnée n'a établi précisément l'existence d'un facteur responsable de la relation entre gnose digitale et performances arithmétiques. Pour autant, même si l'hypothèse selon laquelle le comptage sur les doigts médiatise la relation gnose digitale et performances arithmétiques a été invalidée dans notre travail, le comptage sur les doigts reste un élément central pour le développement des habiletés arithmétiques.

En effet, comme mentionné dans l'introduction, Jordan et al. (2008) ont montré l'existence d'une relation positive entre la fréquence d'utilisation des doigts pour calculer et les performances arithmétiques chez des enfants âgés en moyenne de 6 ans. Les résultats de notre recherche confirment cette observation. En effet, nous avons montré que plus les enfants calculent sur leurs doigts, plus ils obtiennent de bonnes performances à la tâche de calcul. A 6 ans, l'utilisation de la

stratégie de comptage sur les doigts dans une tâche d'additions simples semble donc être une bonne stratégie pour calculer. Notre étude a également montré un lien entre les capacités cognitives des enfants et l'utilisation des doigts pour calculer. En fait, plus les enfants ont de fortes capacités en mémoire de travail, plus ils utilisent leurs doigts pour résoudre des calculs arithmétiques de base. Ce résultat suggère que découvrir et mettre en place la stratégie de comptage sur les doigts dans une tâche de calcul nécessite la mobilisation de trop de ressources cognitives pour les enfants ayant une faible mémoire de travail. Par conséquent, il serait trop difficile pour ces enfants d'utiliser leurs doigts pour calculer dans une tâche arithmétique. Cette observation corrobore celle de Gathercole, Lamont et Alloway (2006) selon laquelle les enfants présentant de plus faibles capacités en mémoire de travail auraient plus de difficultés à tirer profit des aides externes numériques, comme les blocs Unifix, conçus justement pour réduire les demandes de traitement. En effet, les auteurs ont constaté que ces enfants n'utilisaient pas de tels dispositifs mais étaient plus orientés vers des stratégies de "niveau inférieur" (p. 138), sujettes aux erreurs telles que le comptage simple, dont les exigences de traitement sont moindres. Pour autant, cela ne signifie pas que les enfants avec de faibles capacités en mémoire de travail n'utilisent jamais leurs doigts pour calculer. En effet, nous avons montré que ces enfants pouvaient utiliser leurs doigts pour calculer mais avec moins d'efficacité que les enfants avec de fortes capacités en mémoire de travail. Plus précisément, les enfants présentant de faibles capacités en mémoire de travail ont tendance à mettre en œuvre la stratégie la moins mature, la stratégie "All", qui consiste à représenter les deux opérands sur les doigts avant de tout recompter. À l'inverse, les enfants avec de fortes capacités en mémoire de travail utilisent plus souvent des stratégies élaborées et efficaces, notamment la stratégie "Min" qui consiste à compter à partir du plus grand des deux opérands. Selon Groen et Resnick (1977), il existe chez l'homme un facteur de motivation "en faveur de l'efficacité cognitive" (p.651). Autrement dit, les personnes chercheraient à effectuer les tâches régulièrement rencontrées de manière la plus simple et la plus rapide possible. Une telle tendance a d'ailleurs été proposée par Klahr et Wallace (1976) comme facteur de motivation majeur du développement cognitif. Dans ce cas, il n'est pas surprenant que nos résultats montrent que les enfants avec des capacités en mémoire de travail élevées soient plus tôt "poussés" à découvrir les stratégies les plus efficaces, et notamment la stratégie "Min" qui est considérée comme la stratégie la plus sophistiquée (Baroody, 1987). Dans l'ensemble, ces résultats montrent l'existence d'un lien entre comptage sur les doigts dans une tâche de calcul et performances arithmétiques chez les enfants âgés en moyenne de 6 ans et soutiennent donc les données de la littérature (Jordan et al., 2008). De plus, nous montrons ici un lien entre les capacités cognitives et l'utilisation des doigts dans une

tâche d'additions simples chez ces jeunes enfants. Ces observations nous ont conduits à déterminer l'évolution du comportement des enfants avec l'âge et plus précisément l'évolution de l'utilisation des doigts dans la résolution des additions simples et l'impact de cette utilisation sur les performances arithmétiques.

Dans l'étude longitudinale de Jordan et al. (2008), on se souvient que ces auteurs ont montré que la relation entre la fréquence d'utilisation des doigts pour calculer et les performances en arithmétique évolue, c'est-à-dire qu'elle est positive et significative en première et deuxième année puis devient significativement négative en dernière année. Au fur et à mesure du développement, les stratégies de calcul sur les doigts deviennent moins efficaces pour résoudre les calculs car d'autres stratégies de comptage plus sophistiquées et donc plus efficaces, sont mobilisées pour résoudre les calculs. Dans notre étude, nous avons aussi montré que les enfants qui calculent sur leurs doigts en deuxième année obtiennent de meilleures performances que ceux qui ne les utilisent pas en deuxième année. Ce résultat suggère donc que la stratégie de calcul sur les doigts est une bonne stratégie chez les enfants âgés en moyenne 7 ans. Par contre, dans notre étude, les pourcentages de réussite à la tâche d'additions plafonnent (de 92 % à 100 %) en troisième année. Les temps d'exécution des opérations ont alors été considérés comme indices de performance. L'idée est que plus un enfant met du temps pour résoudre les additions, moins il sera performant dans la tâche de calcul. En fait, deux enfants peuvent par exemple très bien réussir à résoudre correctement une addition mais plus un enfant met du temps pour la résoudre, moins il aura été efficace pour effectuer la tâche. Nos résultats montrent que les enfants qui calculent sur leurs doigts pour résoudre les grandes additions mettent significativement plus de temps pour résoudre ces additions que ceux qui ne calculent pas sur leurs doigts. Comme mentionné par Beller et Bender (2011), les doigts ne seront jamais très adaptés pour représenter et calculer des numérosités qui dépassent 10. Il n'est donc pas surprenant que les enfants qui calculent sur leurs doigts pour résoudre des additions dont la somme dépasse 10 rencontrent plus de difficultés et mettent donc plus de temps par rapport aux enfants qui n'utilisent pas leurs doigts. Il reste à noter que l'utilisation de la stratégie de calcul sur les doigts nécessite forcément plus de temps que l'utilisation de stratégies plus internalisées. Il est alors possible que plus les enfants calculent sur leurs doigts, plus ils mettent du temps pour résoudre les additions. Nos résultats ne confirment toutefois pas cette hypothèse. Ainsi, comme l'avait déjà montré Jordan et al. (2008), notre résultat montre que la stratégie de calcul sur les doigts est sûrement utile pour les enfants qui l'utilisent à 8 ans mais ces enfants sont moins performants par rapport aux enfants qui n'utilisent pas leurs doigts pour calculer. En complément de ce que Jordan et al. (2008) avaient montré dans leur étude,

nous avons étudié le lien entre l'utilisation des doigts à 6 ans et les performances en calcul à 8 ans, en considérant la vitesse d'exécution des opérations comme indice de performance. Nos résultats montrent tout d'abord que calculer sur ses doigts à 6 ans est en lien avec la réussite des additions à 8 ans. En effet, les enfants qui calculent sur leurs doigts en première année sont en moyenne plus rapides pour résoudre les additions en dernière année que ceux qui ne calculent pas sur leurs doigts en première année. De manière intéressante, nos résultats suggèrent que calculer sur ses doigts vers l'âge de 6 ans et abandonner cette stratégie vers l'âge de 8 ans est un bon profil pour réussir les additions. En effet, les enfants qui ont commencé à calculer sur leurs doigts en première année et qui continuent de calculer sur leurs doigts en dernière année (i.e. trajectoire "T1 oui T3 oui") sont moins rapides pour résoudre les additions en dernière année que les enfants qui ont abandonné leurs doigts pour résoudre les additions en troisième année (i.e. trajectoire "T1 oui T3 non"). Ainsi, ces données suggèrent que calculer sur ses doigts tôt et abandonner cette stratégie à 8 ans est un bon profil pour réussir les additions simples ultérieurement.

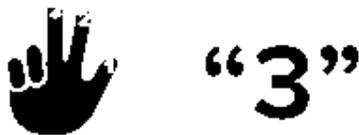
De plus, les données collectées tout au long des trois années de cette recherche nous ont permis de suivre précisément l'évolution du comportement des enfants. En effet, on se souvient que nous avons considéré un groupe d'enfants de 6 ans qui calcule à l'aide des doigts et un groupe d'enfants du même âge qui n'utilise pas ses doigts dans les calculs, et nous avons suivi leur évolution tant au niveau de l'utilisation des doigts que des performances à la tâche de calcul. Nous nous sommes dans un premier temps intéressés à l'évolution du comportement des enfants sur les deux premières années. Nos résultats suggèrent que calculer sur ses doigts les deux premières années est un bon profil pour réussir les calculs en deuxième année par rapport à celui de ne jamais calculer sur ses doigts. En effet, les enfants qui ont mis en place le calcul sur les doigts en première année et qui continuent d'utiliser cette stratégie en deuxième année (i.e. trajectoire "oui oui") obtiennent significativement de meilleures performances en calcul en deuxième année que le groupe des enfants qui n'a jamais utilisé ses doigts pour calculer (i.e. trajectoire "non non"). Nos résultats suggèrent également que calculer sur ses doigts les deux premières années est un bon profil par rapport à celui de calculer sur ses doigts à partir de la deuxième année seulement. Effectivement, les enfants qui ont mis en place le comptage sur les doigts dans la tâche de calcul en première année et qui continuent d'utiliser cette stratégie en deuxième année (i.e. trajectoire "oui oui") obtiennent significativement de meilleures performances en calcul en deuxième année que les enfants qui ont mis en place la stratégie uniquement en deuxième année (i.e. trajectoire "non oui"). Ainsi, ces données montrent l'existence d'un lien entre utilisation des doigts pour calculer vers l'âge de 6 ans et performances arithmétiques vers l'âge de 7 ans et un bon profil

semble être celui de calculer sur ses doigts tôt et d'abandonner cette stratégie rapidement pour réussir les additions simples ultérieurement.

A partir de ces observations, notre attention s'est portée sur l'évolution de l'utilisation des doigts pour calculer et des performances arithmétiques des enfants, tout au long des trois années. Notre étude suggère que calculer sur ses doigts à 6, 7 et 8 ans est un bon profil pour réussir les additions à 8 ans. En effet, les enfants qui utilisent toujours leurs doigts pour calculer (i.e. trajectoire "oui oui oui") sont nettement plus rapides pour résoudre les additions en troisième année que les enfants qui ont mis en place la stratégie de calcul sur les doigts en deuxième année et qui continuent de l'utiliser en dernière année (i.e. trajectoire "non oui oui"). Mais il semble exister un meilleur profil, qui est celui de calculer sur ses doigts vers l'âge de 6 ans et d'abandonner cette stratégie vers l'âge de 7 ans. En effet, les enfants qui ont abandonné leurs doigts pour calculer en deuxième année (i.e. trajectoire "oui non non"), sont plus rapides pour résoudre les additions en troisième année que les enfants qui n'ont jamais utilisé leurs doigts pour calculer (i.e. trajectoire "non non non"). De manière intéressante, nous avons également montré que les enfants qui se sont déjà extraits de leurs doigts pour calculer vers l'âge de 7 ans sont les enfants qui utilisent le moins la stratégie la plus rudimentaire, c'est-à-dire la stratégie "All", et le plus la stratégie sophistiquée, c'est-à-dire la stratégie "Min", l'année précédente. De plus, en lien avec les caractéristiques cognitives, il est intéressant de noter aussi que les enfants qui abandonnent leurs doigts vers l'âge de 7 ans sont les enfants avec les plus fortes capacités en mémoire de travail (i.e. empan moyen de 2.6). A l'inverse, les enfants qui n'ont jamais utilisé leurs doigts pour calculer correspondent aux enfants avec les plus faibles capacités de mémoire de travail (i.e. empan moyen de 1.5). Dans l'ensemble, ces données montrent tout d'abord que les enfants qui calculent tôt sur leurs doigts et qui abandonnent cette stratégie rapidement sont les enfants qui obtiennent les meilleures performances en calcul ultérieurement par rapport aux autres enfants. Et de manière très intéressante, ces données montrent également les enfants qui calculent tôt sur leurs doigts et qui abandonnent cette stratégie rapidement utilisent plus la stratégie sophistiquée (i.e. la stratégie "Min") l'année précédente. Enfin, ces enfants correspondent aussi aux enfants avec les plus fortes capacités en mémoire de travail. D'après ces résultats, il serait sûrement approprié de travailler sur la mise au point d'un programme d'apprentissage de comptage sur les doigts lors de la résolution d'additions simples pour les enfants qui ne calculent pas sur leurs doigts vers l'âge de 6 ans. L'objectif étant de s'assurer que les enfants puissent s'extraire progressivement de l'utilisation des doigts pour calculer afin de pouvoir manipuler mentalement les quantités. Ce programme pourrait être basé sur l'apprentissage des trois principales stratégies de comptage sur les doigts pour

résoudre les additions (Baroody, 1987), à savoir les stratégies "All", "First" et "Min" (cf. figure 11). Parmi les règles à utiliser, l'enfant devrait d'abord apprendre à représenter une quantité sur ses doigts afin d'automatiser progressivement cette représentation de la quantité. Avec la pratique, il reconnaîtrait alors, sans même avoir à compter que les trois premiers doigts levés (i.e. pouce, index et majeur) représentent le nombre 3. Il faudrait ensuite lui apprendre à résoudre une addition en représentant sur ses doigts les deux nombres à additionner. Par exemple, 3+5 se résoudrait en représentant 3 sur une main et 5 sur une autre, puis en recomptant le tout. Ensuite, dans une prochaine étape, l'enfant pourrait garder le 3 dans sa tête et représenter seulement le 5 physiquement, avant de recompter le tout. Il pourrait ainsi partir directement du premier opérande mentalement en disant "3" puis en comptant "4,5,6,7,8" sur les doigts d'une de ses mains. Enfin, il faudrait lui faire comprendre que moins on fait de pas en comptant sur les doigts, plus on va vite et moins on fait d'erreurs. Pour cela, l'enfant devrait apprendre à se représenter le plus grand des deux opérandes mentalement pour ajouter ensuite le plus petit sur ses doigts. Il dirait alors "5" puis "6,7,8" en comptant sur les doigts de sa main. Progressivement, l'enfant utiliserait donc des stratégies de plus en plus sophistiquées et efficaces, lui permettant ainsi de s'affranchir de ses doigts pour calculer et d'opérer aux calculs de manière purement mentale.

*a) Automatiser la représentation*



*c) Mentaliser en partie*



*b) Représenter et additionner*



*d) Optimiser*



Figure 11. Représentation imagée des étapes d'apprentissage de comptage sur les doigts dans une tâche de calcul, adapté de Thevenot et Dupont-Boime (2017).

Il reste toutefois à noter qu'un apprentissage explicite des stratégies de calcul sur les doigts ne sera pas forcément bénéfique pour les enfants avec de faibles capacités en mémoire de travail. En effet, d'après nos résultats, l'utilisation des doigts pour calculer est justement une activité complexe et

de haut niveau sur le plan cognitif. De fait, comme la tâche de calcul est aussi une activité exigeante sur le plan cognitif, un apprentissage des stratégies de calcul sur les doigts pourrait rendre la tâche de calcul encore plus difficile à effectuer pour les enfants avec de faibles capacités en mémoire de travail. Une autre alternative serait alors de travailler sur les premiers apprentissages. En effet, nous avons vu que la découverte des procédures algorithmiques pour les additions simples par les jeunes enfants pourrait être déterminée par leurs connaissances conceptuelles et qu'il serait impossible de véritablement développer le concept de nombre sans avoir d'abord acquis les processus de quantification et notamment celui de dénombrement (Halford, 1993). Selon cette proposition, ce seraient donc les habiletés de dénombrement qui permettraient le développement du concept du nombre et par conséquent, la mise en place spontanée des stratégies pour la résolution d'additions simples, et notamment le comptage sur les doigts. Ainsi, plutôt que de travailler sur l'enseignement formel des stratégies de comptage sur les doigts lors de la résolution d'additions, il serait peut-être intéressant de travailler sur l'apprentissage de l'acquisition de la chaîne numérique et des processus de dénombrement ainsi que sur une meilleure compréhension des concepts liés au nombre et aux opérations. Dans cette perspective, l'acquisition du comptage verbal et son usage dans les processus de quantification serait déterminante pour les apprentissages arithmétiques et mathématiques ultérieurs. Il s'agit d'une interprétation, qui, pour être testée, nécessite un suivi longitudinal et des interventions auprès des populations de jeunes enfants lors d'activités de dénombrement et de résolution de problèmes arithmétiques. En tout cas, selon Baroody (1987), l'utilisation intensive des doigts dans l'apprentissage arithmétique devrait naturellement conduire à l'abandon de cette stratégie.

En effet, selon Baroody (1987), les enfants utilisent d'abord des stratégies de calcul sur les doigts rudimentaires et peu efficaces puis ces stratégies sont remplacées par des stratégies plus sophistiquées et efficaces. Plus précisément, la pratique permettrait le passage de stratégies rudimentaires où tous les éléments sont représentés de manière externe, comme la stratégie "All" à des stratégies où l'un des opérands est représenté mentalement, comme la stratégie "Min". L'utilisation de stratégies de plus en plus sophistiquées permettrait ainsi aux enfants de s'affranchir à terme des doigts pour calculer et d'opérer aux calculs de manière purement mentale. Nos résultats corroborent cette observation. En effet, comme mentionné précédemment, nos résultats montrent que les enfants qui se sont déjà extraits de leurs doigts pour calculer vers l'âge de 7 ans sont les enfants qui utilisent le moins la stratégie la plus rudimentaire, c'est-à-dire la stratégie "All", et le plus la stratégie sophistiquée, c'est-à-dire la stratégie "Min", l'année précédente. De même, les enfants qui se sont extraits de leurs doigts pour calculer à 8 ans sont les enfants qui utilisent le

moins la stratégie "All" et le plus la stratégie "Min" l'année précédente. En fait, selon Siegler et Jenkins, (1989), les nouvelles stratégies sont des modifications des stratégies déjà connues. La stratégie "Min" est une amélioration de la stratégie "First" qui elle, est une amélioration de la stratégie "All". Ainsi, par exemple, les enfants utiliseraient d'abord régulièrement la stratégie "All" et de manière occasionnelle la stratégie "First". Avec la pratique, les enfants se rendraient compte que la nouvelle stratégie, ici la "First", se relève en fait particulièrement plus efficace que l'autre stratégie, ici la "All", pour être utilisée régulièrement. De même, avec la pratique, les enfants se rendraient compte par la suite que la nouvelle stratégie, la "Min", se relève particulièrement plus efficace que la stratégie "First", pour être utilisée régulièrement. Toutefois, selon Carpenter et Moser (1984), la stratégie "All" est bien plus différente que les stratégies "Count on" (i.e. "First" et "Min"). En effet, selon ces auteurs, lorsque la stratégie "All" est utilisée, les doigts ne représentent pas les opérands en soi c'est-à-dire qu'ils ne seraient pas réellement utilisés pour représenter les collections à additionner mais plutôt pour contrôler la progression du comptage. Les stratégies "Count on", quant à elles, sont plus efficaces car l'enfant reconnaît qu'il n'est pas nécessaire de reconstituer l'ensemble des opérands sur les doigts pour parvenir au résultat. Pour passer de la stratégie "All" à une stratégie "Count on", les enfants doivent alors être capables de se représenter mentalement un des deux opérands afin de pouvoir calculer le deuxième opérande sur les doigts. En ce sens, la découverte d'une nouvelle stratégie ne pourrait pas s'expliquer que par une pratique régulière du calcul sur les doigts. De plus, nos résultats montrent que certains enfants utilisent directement des stratégies "Count on" (i.e. "First" et "Min") lorsqu'ils commencent à calculer sur leurs doigts. En fait, selon la théorie des vagues qui se chevauchent, formulée par Siegler (1996), un même enfant aurait à sa disposition, tout au long de son développement, plusieurs stratégies pour résoudre des problèmes. Progressivement, l'enfant en viendrait à utiliser certaines de ces stratégies plus ou moins fréquemment, à en découvrir de nouvelles et à en éliminer d'autres. Le choix de la stratégie serait donc adaptatif, dans le sens où les individus tendent à utiliser la stratégie la plus efficace et la moins coûteuse pour résoudre un problème donné. Pour autant, cette observation ne permet pas ici non plus d'expliquer comment les enfants accèdent progressivement aux différentes stratégies. En résumé, les additions sont résolues par les jeunes enfants par des stratégies de calcul sur les doigts mais il est actuellement difficile de déterminer comment les enfants parviennent à découvrir et mettre en place des stratégies de plus en plus efficaces.

Pour conclure, nous avons vu que les observations faites dans la littérature montrent un lien entre l'utilisation des doigts pour calculer et le développement des habiletés arithmétiques (Jordan

et al., 2008). Un débat demeure concernant le caractère nécessaire de l'utilisation des doigts pour le développement des représentations numériques intègres et certains auteurs estiment que l'utilisation des doigts constitue plutôt une aide utile pour la construction des connaissances numériques symboliques sans pour autant être nécessaire à cette construction (Crollen et al., 2011 par exemple). Les données de notre étude ne nous permettent pas de prendre position pour l'une ou l'autre de ces hypothèses. En effet, même si nous avons montré le rôle de l'utilisation des doigts dans le développement des habiletés arithmétiques, il n'est pas exclu que le comptage sur les doigts ne soit pas un passage absolument nécessaire chez les jeunes enfants. Effectivement, la capacité de représenter et de raisonner sur les numérosités n'est pas spécifique aux êtres humains et les animaux font également preuve de certaines capacités que l'on peut rapprocher de celles mises en évidence chez le jeune enfant. Par exemple, il a été montré qu'un chimpanzé pouvait choisir le chiffre arabe correspondant à la somme des oranges qui avaient été cachées dans sa cage en 2 ou 3 endroits différents. De façon encore plus remarquable, lorsque les auteurs substituaient 2 paquets d'oranges pour les remplacer par leur cardinal imprimé sur une carte, le chimpanzé pouvait encore choisir le symbole correspondant à la somme de ces différents cardinaux (Boysen & Berntson, 1989). Dans les deux cas, le chimpanzé n'a pour autant probablement jamais utilisé ses doigts pour compter. Ainsi, même si les auteurs ne vont pas jusqu'à dire que les animaux auraient la capacité d'additionner les quantités comme le ferait un être humain, cela suggère qu'il existe une capacité de représentation et de manipulation des numérosités commune à toutes les espèces. Ainsi, il est possible que le comptage sur les doigts ne soit pas un passage absolument nécessaire chez l'être humain puisqu'il existe des exceptions chez les animaux. En tout cas, lorsque les enfants utilisent leurs doigts pour calculer, il semble important de s'assurer qu'ils puissent, au cours du développement, s'extraire progressivement de leurs procédures initiales afin de pouvoir manipuler mentalement et correctement des quantités et des ensembles abstraits. En effet, chez certains enfants, l'usage prolongé et inadapté du comptage sur les doigts dans des tâches de calcul reflète un besoin persistant d'aides externes compensant probablement les déficiences à se représenter mentalement et correctement les numérosités. C'est le cas des enfants présentant des difficultés en mathématiques, et notamment des enfants dyscalculiques. En l'absence de dépistage et de remédiation adéquate, l'usage persistant du calcul sur les doigts peut même subsister chez l'adulte (Kaufman, Pixner & Göbel, 2011). Rappelons toutefois qu'il existe certaines situations numériques dans lesquelles les adultes vont encore utiliser spontanément leurs doigts pour compter ou calculer. Par exemple, quand on leur demande combien il y a de mois entre février et août. Pour autant, ces adultes ne présentent aucune difficulté en arithmétique ou plus généralement dans des

activités numériques. A tout âge, le comptage sur les doigts resterait alors probablement une des meilleures stratégies pour résoudre certaines situations numériques de la vie quotidienne.



# Références bibliographiques



Andres, M., Di Luca, S., & Pesenti, M. (2008). Finger counting: The missing tool? *Behavioral and Brain Sciences*, *31*(6), 642–643.

Anderson, M.L. (2010). Neural reuse: a fundamental organizational principle of the brain. *Behavioral and Brain Sciences*, *33*, 245–313.

Baroody, A. J. (1987). The development of counting strategies for single-digit addition. *Journal for Research in Mathematics Education*, *18*, 141–157.

Baroody, A. J., & Gannon, K. E. (1984). The development of commutativity principle and economical addition strategies. *Cognition and instruction*, *1*, 321-339.

Barrouillet, P., Thevenot, C. (2013). On the problem-size effect in small additions: Can we really discard any counting-based account? *Cognition*, *128*, 35-44.

Barsalou, L. W. (1999). Perceptual symbol systems. *Behavioral and Brain Sciences*, *22*, 577-660.

Beller, S., & Bender, A. (2011). Fingers as a tool for counting – naturally fixed or culturally flexible? *Frontiers in Psychology*, *2*, 256.

Bender, A., & Beller, S. (2012). Nature and culture of finger counting: Diversity and representational effects of an embodied cognitive tool. *Cognition*, *124*(2), 156-182.

Benton, A. L., (1955). Right-left discrimination and finger localization in defective children. *Archives of Neurology and Psychiatry*, *74*, 583-859.

Benton, A.L. (1961). The fiction of the “Gerstmann syndrome”. *J. Neurol Neurosurg Psychiatry*, *24*(2), 176-181.

Benton, A. L. (1977). Reflections on Gerstmann Syndrome. *Brain and Language*, *4*(1), 45-62.

Berteletti, I., & Booth, J. R. (2015). Perceiving fingers in single-digit arithmetic problems. *Frontiers in Psychology*, *6*, 226.

Boysen, S.T., & Berntson, G.G. (1989). Numerical competence in a chimpanzee (*Pan troglodytes*). *Journal of Comparative Psychology*, *103*, 23-31.

Brissiaud R. (1991). Un outil pour construire le nombre: les collections-témoins de doigts. In J. Bideaud, Fischer J.-P. (Eds.), *Les chemins du nombre* (pp. 59-90). Lille: Presses Universitaires de Lille.

Brissiaud, R. (1992). A tool for number construction: finger symbol sets. In J. Bideaud, C., Meljac, and J.P. Fisher (Eds.), *Pathways to number: Children's developing numerical abilities* (pp. 41-67). Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.

Brissiaud, R. (2003). *Comment les enfants apprennent à calculer*. Paris: Retz.

Butterworth, B. (1999a). *The Mathematical Brain*. London, UK: Macmillan.

Butterworth, B. (2010). Foundational numerical capacities and the origins of dyscalculia. *Trends in cognitive sciences*, 14(12), 534-541.

Carpenter. T. P., Moser. J. M. (1984). The acquisition of addition and subtraction in grades one through three. *Journal of Research in Mathematics Education*, 15, 179-202.

Costa, A. J., Silva, J. B., Chagas, P. P., Krinzinger, H., Lonneman, J., Willmes, K., Wood, G., & Haase, V. G. (2011). A hand full of numbers: a role for offloading in arithmetics learning? *Frontiers in Psychology*, 2, 368.

Cowan, R., & Renton, M. (1996). Do they know what they are doing ? Children's use of economical addition strategies and knowledge of commutativity. *Educational Psychology*, 16, 409-422.

Crollen, V., Mahe, R., Collignon, O. & Seron, X. (2011). The role of vision in the development of finger-number interactions: finger counting and finger-montring in blind children. *Journal of Experimental Child Psychology*, 109, 525-539.

Crollen, V., & Noël, M.-P. (2015). The role of fingers in the development of counting and arithmetic skills. *Acta Psychologica*, 156, 37.

Di Luca, S., Grana, A., Semenza, C., Seron, X. & Pesenti, M. (2006). Finger-digit compatibility in Arabic numeral processing. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 59, 1648-1660.

Di Luca, S., & Pesenti, M. (2008). Masked priming effect with canonical finger numeral configurations. *Experimental Brain Research*, 185(1), 27-39.

Domahs, F., Krinzinger, H., & Willmes, K. (2008). Mind the gap between both hands: Evidence for internal finger-based number representations in children's mental calculation. *Cortex*, 44, 359-367.

Fayol, M., Barrouillet, P., & Marinthe, C. (1998). Predicting mathematical achievement from neuropsychological performance. A longitudinal study. *Cognition*, 68, 63-70.

Fayol, M., & Seron, X. (2005). About numerical representations: insights from neuropsychological, experimental, and developmental studies. In I. I. D. Campbell (Ed.), *Handbook of Mathematical Cognition* (pp. 3–22). New York: Psychology Press.

Fischer, J. P., (2010). Numerical performance increased by finger training. *Trends in Cognitive Sciences*, 8, 307-314.

Fischer, M. H., & Brugger, P. (2011). When digits help digits: spatial-numerical associations point to finger counting as prime example of embodied cognition. *Frontiers in Psychology*, 2, 260.

Fuson, K. C. (1982). An analysis of the counting-on solution procedure in addition. In T. P. Carpenter, J. M. Moser, & T. A. Romberg (Eds.), *Addition and subtraction: A cognitive perspective* (pp. 67–81). Hillsdale, NJ: Erlbaum.

Gathercole, S. E., Lamont, E., & Alloway, T. (2006). Working memory in the classroom. In S. J. Pickering (Ed.), *Working memory and education* (pp. 219–249). Oxford: Elsevier Press.

Geary, D. C. (1990). A componential analysis of an early learning deficit in mathematics. *Journal of Experimental Child Psychology*, 49, 363-383.

Geary, D. C., (1993). Mathematical disabilities: Cognitive, neuropsychological, and genetic components. *Psychological Bulletin*, 114, 345-362.

Geary, D. C., Brown, S., & Samaranayake, V. (1991). Cognitive addition: A short longitudinal study of strategy choice and speed-processing differences in normal and mathematically disabled children. *Developmental Psychology*, 27, 787-797.

Gelman, R., & Gallistel, C. R. (1978). *The child's understanding of number*. Cambridge, MA: Harvard University Press.

Gerstmann, J. (1940). Syndrome of finger agnosia, disorientation for right and left, agraphia and acalculia - Local diagnostic value. *Archives of Neurology and Psychiatry*, 44(2), 398-408.

Goodenough, F. (1926). *L'intelligence d'après le dessin. Le test du bonhomme*. Paris : PUF (traduction française, 1957).

Gracia-Bafalluy, M., & Noël, M. P. (2008). Does finger training increase young children's numerical performance? *Cortex*, 1, 1–8.

Groen, G.J., & Parkman, J. M. (1972). A chronometric analysis of simple addition. *Psychological Review*, 79, 329–343.

Groen, G., & Resnick, L. B. (1977). Can preschool children invent addition algorithms? *Journal of Educational Psychology*, 69, 645–652.

- Halford, G. S. (1993). *Children's understanding: The development of mental models*. Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- Hubbard, E.M., Piazza, M., Pinel, P., & Dehaene, S. (2005). Interactions between number and space in parietal cortex. *Nature Reviews*, 6, 435–448.
- Ifrah, G. (1981). *Histoire naturelle des chiffres*. Paris : Robert Laffont.
- Ifrah, G. (1994). *Histoire universelle des chiffres: l'intelligence des hommes racontée par les nombres et le calcul*. R. Laffont.
- Jordan, N. C., Kaplan, D., Ramineni, C., & Locuniak, M. N. (2008). Development of number combination skill in the early school years: When do fingers help? *Developmental Science*, 11, 662–668.
- Kaufmann, L., Pixner, S., & Göbel, S. M. (2011). Finger usage and arithmetic in adults with math difficulties: evidence from a case report. *Frontiers in Psychology*, 2, 254.
- Kinsbourne, M., Elizabeth, B. M. & Warrington, K. (1963). The Developmental Gerstmann Syndrome. *Archives Neurologiques*, 8, 490-501.
- Klahr, D., & Wallace, J. G. (1976). *Cognitive development: An information-processing view*. Oxford, England: Lawrence Erlbaum.
- Klein, E., Moeller, K., Willmes, K., Nuerk, H-C. & Domahs, F. (2011). The influence of implicit hand-based representations on mental arithmetic. *Frontiers in Psychology*, 2, 197.
- Lafay, A., Thevenot, C., Castel, C., & Fayol, M. (2013). The role of fingers in number processing in young children. *Frontiers in Developmental Psychology*, 4, 488.
- Lefavrais P., (1967). *Test de l'Alouette*. Paris : Edition du Centre de Psychologie Appliquée.
- Lezak, M. D., Howieson, D. B., & Loring, D. W. (2004). *Neuropsychological assessment* (4th ed.). New York: Oxford University Press.
- Long, I., Malone, S. A., Tolan, A., Burgoyne, K., HeronDelaney, M., Witteveen, K., & Hulme, C. (2016). The cognitive foundations of early arithmetic skills: It is counting and number judgment, but not finger gnosis, that count. *Journal of Experimental Child Psychology*, 152, 327–334.
- Lucidi, A., & Thevenot, C. (2014). Do not count on me to imagine how I act: behavior contradicts questionnaire responses in the assessment of finger counting habits. *Behavior Research Methods*.

Marinthe, C., Fayol, M., & Barrouillet, P. (2001). Gnosies digitales et développement des performances arithmétiques. In A. Van Hout, C. Meljac, & J. P. Fischer (Eds.), *Troubles du calcul et dyscalculies chez l'enfant*, (pp. 239–254). Paris: Masson.

Newman, S. D. (2016). Does finger sense predict addition performance? *Cognitive Processing*, 17(2), 139-146.

Noël, M. P. (2005). Finger gnosis: A predictor of numerical abilities in children? *Child Neuropsychology*, 11, 413–430.

Noël, M.-P., Seron, X., & Trovarelli, F. (2004). Working memory as a predictor of addition skills and addition strategies in children. *Cahiers de Psychologie Cognitive*, 22, 3-25.

Penner-Wilger, M., & Anderson, M. L. (2008, July). An alternative view of the relation between finger gnosis and math ability: Redeployment of finger representations for the representation of number. In *Proceedings of the 30th annual meeting of the Cognitive Science Society, Austin, TX* (pp. 1647-52).

Penner-Wilger, M., & Anderson, M. L. (2013). The relation between finger gnosis and mathematical ability: why redeployment of neural circuits best explains the finding. *Frontiers in psychology*, 4.

Penner-Wilger, M., Fast, L., LeFevre, J., Smith-Chant, B. L., Skwarchuk, S., Kamawar, D., & Bisanz, J. (2009). Subitizing, finger gnosis, and the representation of number. *Proceedings of the 31st Annual Cognitive Science Society*, 520-525.

Poeck, K. (1964). Phantoms following amputation in early childhood and in congenital absence of limbs. *Cortex*, 1(3), 269-275.

Poeck, K., & Orgass, B. (1966). Gerstmann's syndrome and aphasia. *Cortex*, 2, 421-437.

Poole, J.L., Burtner, P. A., Torres, T.A., McMullen, C.K., Markham, A., Marcum, M.L., et al., (2005). Measuring dexterity in children using the Nine-hole Peg Test. *Journal of Hand Therapy*, 18, 348-351.

Raven, J., Raven, J.C., & Court, J.H. (2003). Manual for Raven's Progressive Matrices and Vocabulary Scales. Section 1: General Overview. San Antonio, TX: Harcourt Assessment.

Reeve, R., & Humberstone, J. (2011). Five- to 7-Year-Olds' Finger Gnosis and Calculation Abilities. *Frontiers in Psychology*, 2:359.

Rousselle, L., Noël, M. P. (2008). The development of automatic numerosity processing in preschoolers: Evidence for numerosity-perceptual interference. *Developmental Psychology*, 44, 544-560.

Roux, F. E., Boetto, S., Sacko, O., Chollet, F., & Trémoulet, M. (2003). Writing, calculating, and finger recognition in the region of the angular gyrus: a cortical stimulation study of Gerstmann syndrome. *Journal of Neurosurgery*, *99*, 716-727.

Rusconi, E., Walsh, V., & Butterworth, B. (2005). Dexterity with numbers: rTMS over left angular gyrus disrupts finger gnosis and number processing. *Neuropsychologia*, *43*(11), 1609-1624.

Sandrini, M. & Rusconi, E. (2009). A brain for numbers. *Cortex*, *45*, 796-803.

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

Siegler, R. S., & Crowley, K. (1994). Constraints on learning in non-privileged domains. *Cognitive Psychology*, *27*, 194-226.

Siegler, R. S., & Jenkins, E. (1989). *How children discover new strategies*. Hillsdale, NJ: Erlbaum.

Siegler, R. & Shrager, J. (1994). Strategy choice in addition and subtraction: How do children know what to do? In C. Sophian. *Origins of cognitive skills* (pp. 229-293). Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum.

Thevenot, C., Castel, C., Danjon, J., Ballaz, C., Baggioni, L., & Fluss, J. (2014). Numerical abilities in children with congenital hemiplegia: An investigation of the role of finger use in number processing. *Developmental Neuropsychology*, *39*, 88-100.

Thevenot, C., & Dupont-Boime, J. (2017). Faut-il compter sur ses doigts à l'école ? *Cerveau & Psycho*, *92*.

Thevenot, C., & Oakhill, J. (2006). Representations and strategies for solving dynamic and static arithmetic word problems: The role of working memory capacities. *European Journal of Cognitive Psychology*, *18*, 756-775.

Trotter J.S., Davis A.S. (2011) Finger Localization. In Kreutzer J.S., DeLuca J., Caplan B. (eds) *Encyclopedia of Clinical Neuropsychology*. New York: Springer.

Wechsler, David (1939). The measurement of adult intelligence. Baltimore: Williams & Wilkins, p. 229.

Wilson, M. (2002). Six views of embodied cognition. *Psychonomic Bulletin & Review*, *9*, 625-636.

Zago, L., Pesenti, M., Mellet, E., Crivello, F., Mazoyer, B., & Tzourio-Mazoyer, N. (2001). Neural correlates of simple and complex mental calculation. *Neuroimage*, 13(2), 314-327.