



**HAL**  
open science

## Evaluation des bénéfices d'un dispositif d'entraînement à l'usage des doigts en mathématiques

Nathalie Bonneton-Botté, Fanny Ollivier, Hélène Hili, Florence Bara

### ► To cite this version:

Nathalie Bonneton-Botté, Fanny Ollivier, Hélène Hili, Florence Bara. Evaluation des bénéfices d'un dispositif d'entraînement à l'usage des doigts en mathématiques. *Canadian Journal of School Psychology*, 2022, pp.082957352210819. 10.1177/08295735221081960 . hal-03681334

**HAL Id: hal-03681334**

**<https://hal.science/hal-03681334v1>**

Submitted on 26 Feb 2024

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

**Evaluation des bénéfices d'un dispositif d'entraînement à l'usage des doigts en  
mathématiques**

**Evaluation of the benefits of a device for training the use of fingers in  
mathematics**

Bonneton-Botté N.<sup>1</sup>, Ollivier F.<sup>2</sup>, Hili H., Bara F<sup>3</sup>.

Adresse auteur correspondant : Univ Brest, LP3C, 29000 Brest, France.

INSPE-UBO, 1 rue Théodule Ribot, 22000 Saint-Brieuc, France.

Email : [Nathalie.bonneton@inspe-bretagne.fr](mailto:Nathalie.bonneton@inspe-bretagne.fr)

<sup>1</sup> LP3C, INSPE de Bretagne, Université de Bretagne Occidentale.

<sup>2</sup> LP3C, Université Rennes 2.

<sup>3</sup> CLLE-LTC, INSPE Midi-Pyrénées, Université Toulouse-Jean-Jaurès.

#### Remerciements

Nous tenons à remercier l'éducation nationale et plus particulièrement Pascal Percheron, Inspecteur de la circonscription de Saint-Brieuc EST et son équipe ainsi que les conseillers pédagogiques qui nous ont accompagné (Nathalie Carluéc, Philippe Lucas, Aligne Legrand). Enfin, nous remercions l'ensemble des enseignants qui ont collaboré à cette recherche, ainsi que les parents et les élèves.

## Résumé

De nombreuses études ont montré une relation positive significative entre la représentation mentale des mains chez le jeune enfant et ses performances en calcul. La littérature indique que certaines composantes de la motricité manuelle seraient déterminantes pour la qualité de cette relation. L'objectif de cette étude est de mesurer en contexte scolaire le bénéfice d'un dispositif d'entraînement et d'enseignement explicite à l'usage des doigts en mathématiques en veillant à mesurer les capacités initiales d'imitation motrice de gestes du jeune enfant. Un protocole de type pré-test, entraînement, post-test a été proposé à 101 enfants âgés en moyenne de 5 ans et 3 mois répartis dans deux groupes (entraîné vs. passif). Les mesures portent sur la motricité manuelle et sur les premiers calculs. Le dispositif d'entraînement mené en classe durant 12 semaines vise le développement de la motricité manuelle et un enseignement explicite de l'usage des doigts en mathématiques. Les résultats indiquent que des progrès significatifs ont été réalisés en calcul pour les élèves qui ont bénéficié de l'entraînement. De façon intéressante, l'étude montre que ces progrès sont modulés par les capacités d'imitation motrice initiale des enfants. Cette contribution ouvre des perspectives d'applications et de recherches nouvelles sur les relations entre imagerie mentale motrice, capacité de motricité fine et habiletés arithmétiques ou de calcul.

**Mots-clés :** motricité manuelle ; calcul ; entraînement ; imitation motrice.

### **Evaluation of the benefits of a device for training the use of fingers in mathematics**

#### **Abstract**

Numerous studies have shown a significant positive relationship between the mental representation of hands in young children and their calculation performance. The literature indicates that certain components of manual motor skills may be critical to the quality of this relationship. The main objective of this study is to measure the benefit of an explicit training and teaching device for finger use in mathematics by measuring the initial motor imitation abilities of young children. A protocol of pre-test, training and post-test type was proposed to

101 children with an average age of 5 years and 3 months. Measurements focused on manual motor skills and arithmetical skills. The 12-week classroom-based device was designed to develop manual motor skills and explicitly teach finger use in mathematics. The results indicate that significant progress was made in arithmetic for the students who benefited from the training. Interestingly this progress is modulated by the children's initial motor imitation skills. This contribution opens up new research and application perspectives on the relationships between mental motor imagery, fine motor skills and arithmetic ability.

Keywords: manual motricity; calculation; training; motor imitation.

## **Introduction**

Le recours aux doigts est aujourd'hui reconnu comme déterminant dans la construction des premières habiletés mathématiques chez l'enfant (Guedin, Thevenot, & Fayol, 2018 ; Seron & Crollen, 2018). Si l'origine phylogénétique ou ontogénétique de cette relation fait débat (cf. Seron & Crollen, 2018 sur cette question fondamentale), le rôle de l'apprentissage lui-même est assez peu considéré, les recherches interventionnelles en psychologie de l'éducation restant rares sur ces questions. Moeller, Martignon, Wessolowski, Engel et Nuerk (2011) regrettent d'ailleurs une absence de dialogue entre mathématiciens et chercheurs en neurosciences sur ce sujet, les premiers considérant que l'usage des doigts est avant tout une pratique dont il faut se débarrasser (Krauthausen & Scherer, 2001), les seconds considérant parfois au contraire, dans une perspective incarnée, que le recours aux doigts est au fondement du nombre (Butterworth, 1999). Moeller et al. (2011) formulent le vœu d'un meilleur dialogue entre les disciplines afin que des dispositifs d'enseignement prometteurs soient conçus à partir d'approches pluridisciplinaires.

A l'école, la motricité manuelle des enfants est particulièrement sollicitée lorsqu'il s'agit de raisonner sur des quantités ou sur des nombres (Pitchford, Papini, Outhwaite & Gulliford, 2016). Les mains peuvent être utilisées lors d'activités de dénombrement, d'énumération, de manipulation d'objets de collection à quantifier, de comptage, de calcul ou pour représenter des nombres (Seron & Crollen, 2018). Ces sollicitations diverses en situation d'apprentissage impliquent que la motricité manuelle de l'enfant soit relativement fonctionnelle c'est-à-dire que ses actions motrices soient suffisamment rapides, précises et coordonnées pour répondre aux exigences de la tâche et au rythme imposé par le collectif de la classe.

L'objectif de cette étude de type interventionnelle est de mesurer le bénéfice d'un dispositif d'enseignement et d'entraînement à l'usage des doigts sur les premières habiletés de calcul. Considérant le recours aux doigts comme une habileté manuelle complexe, nous avons cherché à savoir si un enseignement de l'usage des doigts bénéficiait à tous les enfants de la même façon quelle que soit leur capacité d'imitation motrice manuelle initiale.

#### *La relation entre les représentations mentales des mains, le recours aux doigts et la réussite en calcul*

La relation entre les mains et les nombres a été appréhendée en considérant soit les représentations mentales des mains (mesurées par les gnosies digitales ou le dessin de la main) soit en analysant la fréquence et l'efficacité du recours aux doigts dans des situations mathématiques variées.

La gnosie digitale peut se définir comme la capacité à se représenter mentalement sa main et à positionner ou identifier un stimulus tactile en l'absence de feedback visuel. Dans une étude longitudinale menée par Marinthe, Fayol et Barrouillet (1999), les capacités perceptivo-tactiles de 300 enfants de 5 à 6 ans prédisent mieux leurs performances à une tâche de calcul que leur niveau de développement intellectuel. Trois ans plus tard, la même équipe de chercheurs montre que cette relation se maintient dans le temps pour les mêmes enfants. Afin de tester l'effet des gnosies

digitales sur les compétences numériques, Gracia-Bafalluy et Noël (2008) proposent un entraînement des gnosies comprenant des activités de motricité manuelle à des élèves de première année de primaire dont le niveau de gnosie digitale est faible (N=16). Après 8 semaines d'entraînement aux gnosies digitales, le groupe expérimental obtient de meilleures performances aux tests de gnosie et à certains tests mathématiques que le groupe n'ayant pas reçu l'entraînement et présentant le même niveau de gnosie initial. En étudiant les caractéristiques des dessins de mains réalisés par des enfants de 4 ans à 5 ans 6 mois, Bonneton-Botté, Hili, De La Haye et Noël (2015) ont établi que les enfants qui réalisent un dessin de la main complet (*i.e.*, constitué de 5 doigts et d'une paume) et planifié (*i.e.* dessiné d'un trait) sont ceux qui réussissent le mieux une épreuve de correspondance terme à terme (*i.e.*, être capable de composer une collection identique à une collection témoin).

Une autre façon d'investiguer le rôle des doigts en mathématiques consiste à étudier leur bénéfice sur la construction du nombre (*e.g.*, tâche de dénombrement, de décomposition de nombre, de cardinalité, de correspondance terme à terme) ou sur les capacités de calcul (*e.g.*, problèmes verbaux ou problèmes arithmétiques). Les enfants utilisent spontanément et fréquemment leurs doigts pour soutenir leurs activités numériques et arithmétiques (Butterworth, 1999, 2005; Fuson, 1998; Geary, 2007; Gallistel & Gelman, 1992; Lucidi & Thevenot, 2014; Newman, 2016; Sato & Lalain, 2008) même si les procédures utilisées diffèrent d'une culture à l'autre (Bender & Beller, 2012). L'utilisation des doigts permet au jeune enfant de représenter les quantités de façon analogique avant que les représentations symboliques ne soient disponibles et d'effectuer des calculs sur ces représentations (Siegler & Shrager, 1984). Dans une perspective incarnée, le traitement numérique se fonderait sur des systèmes sensorimoteurs développés et enrichis par l'utilisation des doigts (Lakoff & Nuñez, 2000). L'approche incarnée se double d'une approche située (Versace, Brouillet & Vallet, 2018), de nombreux chercheurs considérant que l'usage des doigts occupe une fonction d'aide à la conceptualisation du nombre et des calculs dans de

nombreuses cultures. Certaines preuves empiriques alimentent cette approche fonctionnelle. Les enfants qui utilisent le plus souvent les doigts pour calculer dans les classes préscolaires sont ceux qui effectuent le mieux les tâches arithmétiques (Jordan, Kaplan, Ramineni, & Locuniak, 2008). Cependant, l'utilisation des doigts ne semble toutefois pas identique chez tous les enfants. Jordan et al. (2008) ont étudié les trajectoires développementales du recours aux doigts au cours de tâches de résolution problème de la maternelle à la fin de la deuxième année d'école élémentaire chez des enfants issus de milieux socio-économiques faibles ou moyens. Les résultats montrent que les enfants de maternelle les moins performants sur le plan numérique, qui sont également issus de milieux à faibles revenus, n'utilisent presque jamais leurs doigts spontanément contrairement aux enfants issus de milieux à revenus moyens. En outre, les enfants issus de milieux à faibles revenus montrent un recours croissant aux doigts au cours de la période étudiée, tandis que cette stratégie diminue progressivement chez les enfants issus de milieux à revenus moyens à partir de la deuxième année. Pour les auteurs, la trajectoire des enfants de milieux à revenus moyens (qui pour rappel utilisent leurs doigts moins souvent en première année qu'en maternelle) suggère qu'ils ont eu plus rapidement recours à un calcul mental précis ou à une récupération de faits arithmétiques. Plus récemment, Dupont-Boime et Thevenot (2018) sont arrivées aux mêmes conclusions que Jordan et al. (2008) et ont montré que les enfants suisses romands âgés de 5 à 6 ans qui comptent sur leurs doigts réussissent mieux une tâche d'addition que les enfants qui ne le font pas. De plus, elles montrent que les enfants qui calculent en utilisant leurs doigts correspondent à ceux qui ont les meilleures capacités de mémoire de travail, suggérant qu'en plus des facteurs évoqués par Jordan et al. (2008) (*i.e.*, la culture et l'environnement familial), certaines fonctions cognitives générales pourraient moduler le recours aux doigts.

En résumé, le rôle fonctionnel des doigts pour le développement des habiletés mathématiques est actuellement assez consensuel. Dans cette perspective, il devient nécessaire d'étudier les facteurs

qui contribuent à l'efficacité du recours aux doigts en mathématiques. Parmi ces facteurs, la motricité manuelle a fait l'objet de plusieurs études.

*La motricité fine, un facteur décisif et un enjeu d'apprentissage ?*

La motricité fine correspond à des « petits mouvements musculaires nécessitant une coordination étroite œil-main » (Luo, Jose, Huntsinger, & Pigott, 2007, p. 596). Asakawa et Sugimura (2014) ont établi que la dextérité manuelle est significativement corrélée aux capacités de calcul additif (mais pas au vocabulaire), alors que la répétition rythmique d'un mouvement (*i.e. tapping*) ne l'est pas. De la même façon, Pitchford, et al. (2016) ont observé qu'au cours des deux premières années d'école primaire, la motricité fine prédit mieux les habiletés mathématiques que les habiletés de lecture. Suggate, Stoager et Fischer (2017) précisent cette relation en montrant que la motricité fine et les habiletés mathématiques sont liées par les habiletés numériques basées sur les doigts (*i.e.*, toute tâche nécessitant l'usage de ses doigts ou la reconnaissance d'une quantité représentée par des doigts). En 2020, les mêmes auteurs confirment que les relations entre les performances en dextérité (et non celle de graphomotricité) et les performances numériques sont médiées par les représentations numériques basées sur les doigts (Fischer, Suggate, & Stoeger, 2020). Quelques études indiquent qu'un entraînement de la motricité fine pourrait améliorer les performances en calcul. Dans l'étude de Gracia-Bafalluy et Noël (2005) précédemment mentionnée, l'entraînement aux gnosies digitales qui impliquait aussi des exercices de motricité manuelle, s'est traduit par des meilleures performances à certaines habiletés numériques. Ollivier, Noël, Legrand et Bonneton-Botté (2019) ont proposé un entraînement en motricité fine associé à un enseignement explicite de l'usage des doigts et ont observé une augmentation du recours spontané aux doigts en situation de calcul, associé à de meilleures performances en calcul chez des enfants âgés en moyenne de 5 ans. Asakawa, Murakami et Sugimura (2017) ont entraîné 80 élèves de première année soit à des tâches de motricité fine (enfiler des perles, opposition de chaque doigt, muscler les doigts par des mouvements de pression) durant 10 minutes quotidiennes soit à une tâche contrôle de lecture.

L'entraînement en motricité fine s'est traduit par une amélioration des compétences arithmétiques et par une augmentation du score à une tâche de motricité fine mais ne s'est pas accompagné d'une amélioration de la gnose des doigts ; ainsi dans cette étude la gnose des doigts ne peut pas être à l'origine de l'amélioration des performances arithmétiques. S'appuyant sur la littérature existante, les auteurs évoquent trois hypothèses non exclusives pour expliquer leurs résultats i) les zones cérébrales qui gouvernent les habiletés arithmétiques et celles de la motricité manuelle sont communes (Barsalou, 2008 ; Penner-Wilger & Anderson, 2013) ii) un renforcement de la motricité manuelle pourrait se traduire par une augmentation de la connaissance incarnée du nombre (Suggate et al., 2017) iii) l'efficacité des fonctions exécutives qui jouent un rôle à la fois dans les habiletés arithmétiques et motrices pourrait avoir été augmentée par un entraînement de la motricité fine (Diamond, 2000).

Ces résultats suggèrent aussi qu'une motricité manuelle insuffisamment développée pourrait constituer une charge cognitive problématique en situation d'apprentissage mathématiques qu'il soit formel ou informel (Bara & Tricot, 2017). Fischer et al. (2020), en cohérence avec l'hypothèse « main agile, esprit agile » de Suggate et Stoager (2017) recommandent de soutenir le développement de la motricité fine et d'encourager le recours aux doigts chez les jeunes enfants afin notamment de développer les premières habiletés mathématiques.

*Le recours aux doigts en calcul : une habileté manuelle complexe.*

Les recherches précédemment mentionnées s'intéressent à la relation entre motricité fine et mathématique en étudiant les composantes de dextérité (parfois appelée intégration visuo-motrice ou habileté perceptivo-motrice) et de renforcement musculaire ou le déliement des doigts dans des tâches de production-reconnaissance de configuration de doigts ou dans des tâches de calcul. Cependant, le recours aux doigts lors d'un calcul n'a pas été à notre connaissance envisagé comme une habileté bimanuelle se précisant au fur et à mesure des occasions offertes à l'enfant de la faire progresser. La capacité à représenter des quantités différentes sur chaque main puis à opérer des

transformations d'état par des mouvements de doigts peut être associée à une habileté bimanuelle c'est-à-dire une capacité à planifier et exécuter intentionnellement des gestes pour atteindre un but. Les habiletés manuelles n'émergent pas spontanément mais sont le résultat d'apprentissage implicite ou explicite requérant différentes stratégies comme les conduites imitatives ou les répétitions (Goodway, Crowe, & Ward, 2003). Dans le cas du recours aux doigts en situation de calcul, les gestes mis en œuvre sont symboliques puisqu'ils représentent des quantités, et demandent le plus souvent (au-delà de la quantité 5) une coordination bimanuelle suffisante : chaque main prend en charge une quantité (différente ou similaire selon les nombres en jeu) et le sujet va baisser ou lever des doigts sur l'une ou l'autre main. En résumé et pour caractériser cette habileté manuelle en référence aux travaux de Fagard (2000), les actions à réaliser par les deux mains sont complémentaires sur le plan cognitif (le but à atteindre consiste à résoudre un problème de calcul) mais généralement asymétriques ce qui demande i) une indépendance d'exécution des deux mains ii) une coordination bimanuelle suffisante pour contrôler l'atteinte du but. De fait, l'apprentissage d'une telle habileté peut être freiné par des contraintes cognitives dans la mesure où l'enfant doit produire une séquence d'actions pertinente au regard du but visé (*i.e.*, un modèle interne ou externe) et doit être capable de se corriger si nécessaire. Confronté à une situation d'imitation de mouvements de main, un mécanisme d'imagerie motrice, c'est-à-dire de simulation mentale du mouvement à reproduire, est possiblement engagé, d'une part au moment de l'observation de l'action à imiter et d'autre part au moment de la préparation voire de la correction de l'action à réaliser (Jeannerod, 2001 ; Guilbert, Jouen, Lehalle, & Molina, 2013 ; Martzog & Suggate, 2019).

Au-delà des contraintes cognitives, l'apprentissage d'une habileté manuelle peut aussi être modulé par des contraintes motrices liées au système neuromoteur et à la co-activation de plusieurs effecteurs (Fagard, 2000 ; Fagard, Hardy-Léger, Kervella, & Marks, 2001). Ces contraintes neuromotrices sont généralement évoquées pour expliquer différents phénomènes observés lors de

conduites motrices manuelles comme les différences de performances entre main dominante et non dominante ou la présence de syncinésies (Wallon & Denjean, 1962) (*i.e.*, mouvements parasites involontaires qui accompagnent une action unimanuelle ou bimanuelle et qui perdurent jusqu'à l'âge de 10 ans).

Finalement, les contraintes cognitives et neuromotrices interagissent avec le milieu dans lequel évolue un sujet (Newell, 1986 ; Bril, 2002). Ces interactions permettent la construction d'affordances au cours de l'apprentissage, que Bril définit comme « la connaissance de ce que le contexte offre comme possibilité d'actions » (Bril, 2002 ; p.255). En offrant ou non des occasions d'observer, d'imiter voire d'entraîner le recours aux doigts selon des procédures spécifiquement culturelles (Andres & Pesenti, 2015 cité par Martzog & Suggate, 2019 ; Bender & Beller, 2012), le milieu facilite ou limite la mise en place d'habiletés motrices bimanuelles utiles aux compétences numériques. Pour exemple, la supériorité des performances de la main dominante sur la main non dominante généralement attribuée à la latéralisation et à l'équipement neuromoteur peut être modifiée par l'entraînement et l'expérience (Provins et Glencross, 1968) cependant, les auteurs observent que la réduction d'écart de performances entre les deux mains est longue à obtenir. Après quatre semaines d'entraînement à une tâche unimanuelle sur chaque main, Annett, Hudson et Turner (1974) constatent chez l'adulte, une relative stabilité du degré d'asymétrie des performances manuelles associée à des différences interindividuelles importantes.

### *But de l'étude*

Représenter, compter, et surtout calculer sur les doigts et le plus souvent avec les deux mains, constituent des tâches exigeantes du point de vue de la dextérité digitale nécessaire à une bonne exécution motrice (Fischer et al., 2020) mais impliquent aussi en amont des capacités d'observation, de planification et de contrôle de l'action de mouvements manuels coordonnés et asymétriques lors des situations d'apprentissage. Comme toute habileté manuelle, le calcul sur les

doigts nécessite un apprentissage (et un contexte qui le soutienne) et des capacités développementales qui permettent cet apprentissage. En conséquence, un usage efficient des doigts en mathématiques pourrait en partie dépendre des occasions qui ont été données à l'enfant d'observer, de reproduire et d'exercer cette habileté, c'est-à-dire aussi des pratiques éducatives qui caractérisent « l'écologie d'apprentissage » (Bril, 2002). Au cours des années qui précèdent l'école élémentaire et en fonction du système scolaire du pays auquel ils appartiennent, les enfants ne reçoivent pas les mêmes sollicitations et ne construisent pas les mêmes affordances. Enfin, des différences interindividuelles inhérentes aux rythmes de développement de la motricité (Blondis et al., 1994) pourraient expliquer que la motricité bimanuelle soit une aide pour la construction des premières habiletés mathématiques ou qu'au contraire elle constitue une charge intrinsèque conséquente (Bara & Tricot, 2017) voire un obstacle lors de certaines situations d'enseignement qui demandent à l'enfant d'observer, de planifier puis d'exécuter des actions bimanuelles symboliques au cours d'un calcul.

Le premier objectif de cette étude est de vérifier s'il existe une relation entre les capacités d'imitation motrice manuelle des enfants et leur capacité à utiliser les doigts pour résoudre des situations de calcul. Notre second objectif est de mesurer, en contexte scolaire, le bénéfice d'un entraînement de la motricité manuelle associé à un enseignement explicite de l'usage des doigts sur la représentation des nombres. En veillant à mesurer les capacités initiales d'imitation motrice de gestes (*i.e.* les habiletés gnoso-praxiques distales), nous cherchons à vérifier à travers trois hypothèses i) que de meilleures capacités d'imitations motrices manuelles sont associées à de meilleures performances en calcul et à un usage plus fréquent des doigts en calcul avant tout dispositif d'enseignement ii) qu'il existe un bénéfice d'un dispositif d'entraînement en motricité manuelle sur certaines composantes de la motricité manuelle (imitation de mouvements de mains, dextérité, coordination bimanuelle) iii) qu'un dispositif d'entraînement mené en contexte

écologique présente un bénéfice pour les habiletés de calcul pour tous les enfants indépendamment de leur capacité d'imitation motrice initiale.

## **Méthodologie**

### **Participants**

101 enfants âgés en moyenne de 5 ans et 3 mois (minimum 4,5 ans et maximum 5,8 mois ; 44 filles et 57 garçons) ont participé à cette étude. Ils sont tous scolarisés en France dans 10 classes de grande section (troisième et dernière année de maternelle en France) de maternelle soit à double niveau (moyenne et grande section) soit à niveau simple (grande section). Les écoles concernées sont situées en zone urbaine et sont fréquentées majoritairement par des familles avec un statut socio-économique moyen. Les critères d'exclusion étaient un niveau en motricité manuelle faible (à plus de deux écart-types sous la moyenne) et un développement atypique. Les résultats d'un élève présentant un critère d'exclusion (niveau d'EMG à plus de deux écarts-types sous la moyenne) n'ont pas été considérés dans les analyses. Les principes éthiques ont été respectés : les données recueillies ont été anonymisées et un consentement parental éclairé a été obtenu pour chaque participant.

### **Procédure et matériel**

Cette recherche de type interventionnel est un protocole quasi-expérimental de type pré-test, entraînement, post-test. Elle se déroule dans un contexte écologique de classe et s'inscrit dans une démarche de recherche collaborative et de formation des enseignants à la recherche et par la recherche animée par deux chercheuses en psychologie et une formatrice en mathématiques. Les données du pré-test ont été recueillies par les enseignants des classes, les conseillers pédagogiques de la circonscription et par les chercheuses et formatrices. Les données des post-tests des classes expérimentales et contrôles ont été recueillies par une chercheuse, une formatrice et les conseillères pédagogiques. L'ensemble des examinateurs qui ont contribué au recueil des données de pré-test

et de post-test ont participé à des sessions de formation pour assurer une homogénéité maximale du protocole de passation. Les passations du pré-test et du post-test étaient individuelles et ont été réalisées dans une pièce calme.

### **Contexte de l'intervention**

Le dispositif d'enseignement et d'entraînement (proposé au groupe expérimental que nous appellerons le groupe entraîné) a été élaboré par les chercheurs et les enseignants et mis en œuvre par les enseignants. Les enseignants en charge des enfants du groupe expérimental « groupe entraîné » ont participé à trois ateliers théoriques et méthodologiques de trois heures (soit 9 heures en tout) au cours desquels ils ont reçu des informations sur les habiletés motrices, la méthodologie expérimentale et sur la façon de suivre un protocole expérimental. Les classes participantes ont été sélectionnées de telle sorte que les pratiques pédagogiques initiales concernant le temps d'enseignement alloué à la résolution de problème soient similaires d'un enseignant à l'autre. Dans un second temps, les classes ont été réparties aléatoirement en classes contrôles ou expérimentales. Des entretiens et des visites de classe menées par les conseillers pédagogiques avant le dispositif ont permis de vérifier que le recours aux doigts en mathématiques était une pratique autorisée par les enseignants mais qu'aucun d'entre eux ne l'enseignait explicitement. Les enseignants des groupes contrôle ont été informés que deux mesures seraient réalisées dans l'année afin de suivre le développement des enfants sans plus de précision. Il leur a été demandé de poursuivre leurs enseignements en ne modifiant rien à leurs habitudes. A la fin du post-test, les enseignants des groupes contrôles qui le souhaitaient ont eu la possibilité de suivre la même formation au protocole et de mettre en place le dispositif d'entraînement dans leur classe.

### **Principe et contenus du dispositif d'enseignement pour le groupe entraîné**

Le groupe entraîné est composé de 42 élèves issus de 5 classes. Les activités qui ont été proposées dans le cadre de ce dispositif s'inspirent de travaux préexistants qui ont démontré l'intérêt

d'entraîner certaines composantes de la perception et de la motricité manuelle (musculature et déliement des doigts, dextérité) pour améliorer certaines habiletés en mathématiques (Asakawa et al., 2017 ; Gracia-Bafalluy & Noël, 2005 ; Ollivier et al., 2019). Elles ont été complétées par des activités visant spécifiquement le développement des habiletés manuelles avec l'intention de renforcer la capacité des jeunes enfants à produire des actions unimanuelles avec la main dominante et non dominante et des actions requérant la coordination des deux mains. Le principe qui a guidé l'ensemble des séances menées est celui de l'enseignement explicite. Pour Bianco et Bressoux (2009), l'enseignement explicite transmet les connaissances et les procédures en les explicitant, en les structurant et en permettant une mémorisation plus aisée. Enoncer explicitement aux élèves les objectifs visés lors d'un atelier de motricité fine ou autoriser explicitement l'usage des doigts, pour composer ou décomposer des nombres contribue à structurer une « écologie de l'apprentissage » (Bril, 2002) dans laquelle le recours aux doigts peut émerger comme une affordance pour soutenir les habiletés numériques.

Le dispositif d'enseignement se compose d'ateliers quotidiens et hebdomadaires menés durant 12 semaines. Le dispositif alterne des ateliers en motricité manuelle et des ateliers en mathématiques. Conformément aux programmes, le temps quotidien dédié aux activités numériques est environ de 30 minutes. Les enseignants avaient le choix entre plusieurs jeux ou activités mais devaient mettre en œuvre plusieurs ateliers en respectant au mieux les durées et les fréquences prévues dans le protocole :

- a. Muscler et délier les doigts, réaliser des actions unimanuelles avec la main dominante et non dominante, coordonner ses deux mains lors d'actions bimanuelles (10 minutes quotidiennement).
- b. Atelier d'exploration tactile et de transfert intermodal (un atelier hebdomadaire de 20 minutes)
- c. Coordonner la main et l'œil dans des activités de motricité fine (10 minutes quotidiennement)
- d. Atelier d'enseignement explicite pour apprendre à composer et décomposer des nombres avec les doigts (10 minutes quotidiennement jusqu'à la 7<sup>ème</sup> semaine).

- e. Observation et comparaison de collections avec les doigts (15 minutes hebdomadaires)
- f. Simuler des transformations de collections en recourant aux doigts (à partir de la 7<sup>ème</sup> semaine du dispositif (15 minutes hebdomadaires).

### **Caractéristique du groupe contrôle**

Le groupe contrôle est un groupe témoin passif qui est composé de 58 élèves issus de 5 classes et qui a poursuivi le programme scolaire de façon habituelle. Aucune instruction spécifique n'a été donnée par les chercheuses. Les enseignants ont simplement été informés que les progrès développementaux des enfants seraient mesurés en décembre et avril à des fins de recherche, sans donner plus de détails sur les compétences évaluées. Ils ont poursuivi leur progression habituelle en classe. Dans ces classes, conformément aux préconisations et aux programmes, le temps alloué à la composition et à la décomposition des numérosités est d'environ 30 min par jour au cours d'activités rituelles collectives (*e.g.*, décompositions du nombre d'enfants entre les absents et les présents) ou de jeux au cours desquels les élèves apprennent à décomposer et à transformer des collections à partir d'un matériel habituel de classe (cubes, jetons, divers objets).

### **Epreuves de Pré-test**

#### *Evaluation des capacités d'imitation motrice manuelle*

La passation réduite prédictive d'imitation de gnosopraxie distale (EMG ; Vaivre-Douret, 2010) est une tâche non verbale qui comporte 12 items d'imitation de gestes réalisés par l'examineur placé face à l'enfant. 8 items sont des actions bimanuelles, 4 sont des actions unimanuelles. Les gestes à imiter n'ont pas de signification particulière. La passation rapide dure quelques minutes, l'enfant assis et placé face à l'examineur doit reproduire le mouvement qui lui est montré : « Nous allons faire des mouvements avec les doigts. Regarde bien ce que je fais avec les doigts et fais exactement comme moi...vas-y ». L'enfant est encouragé tout au long de l'examen et n'est jamais corrigé. Le score attribué était de 0 en cas d'échec ou de 1 pour une réussite, le score

maximal à l'épreuve est de 12. Une différence de deux écart-types à la moyenne constituait un critère d'exclusion pour l'étude cependant les enfants concernés ont pu bénéficier de l'entraînement.

### *Epreuve de dextérité digitale*

Le score de dextérité digitale est obtenu en additionnant les scores obtenus à une tâche d'insertion et à une tâche d'enfilage de perle.

*Tâche d'insertion* : Une boîte percée d'un petit trou est présentée à l'enfant et l'enfant doit enfiler le plus grand nombre de perles possible en 60 secondes (le score est équivalent au nombre de perles enfilées).

*Tâche d'enfilage de perles* : L'épreuve est directement inspirée des travaux de Fischer, Suggate, Schmiral & Stoeger (2017) et de Suggate, Stoeger & Fischer (2017). L'enfilage de perles est une des épreuves proposées dans ces études pour évaluer la dextérité digitale et mesurer des mouvements significatifs et dirigés de petits muscles de la main (Martzog, 2015, cité par Suggate & al.). Il s'agit d'enfiler des perles sur une tige flexible pendant 30 secondes (le score est équivalent au nombre de perles enfilées).

### *Coordination bimanuelle*

Un score de coordination bimanuelle sur 4 est calculé à partir 1) de l'observation de la coordination au cours d'une tâche de dessin 2) de l'observation de la coordination au cours de la tâche d'insertion utilisée pour la dextérité 3) de l'observation de la coordination au cours de la tâche d'enfilage de perles 4) et de l'observation d'une tâche de découpage d'une feuille A4 avec des ciseaux. Un point est attribué chaque fois que la main non active joue bien un rôle de coopération dans chacune de ces tâches (tient la feuille lors du découpage et du dessin, tient la boîte ou la tige pour enfiler les perles).

### *Epreuve mathématique*

Résolution de petits problèmes : Quatre problèmes avec énoncé verbal issus du TEDI-MATH de niveau dernière année de maternelle (TEDI-MATH; Grégoire, Noël & Van Nieuwenhoven, 2001) ont été proposés (de type « Jean a quatre cerises, il en mange deux, combien lui en reste-t-il ? »). La note est 0 pour l'échec et 1 pour la réussite à chaque problème. On attribue également pour chaque problème un 1 si l'enfant a utilisé spontanément ses doigts pour le résoudre et un 0 si cela n'a pas été le cas. Un score maximal de 4 est attribué pour la performance aux problèmes et un second score sur 4 est attribué pour le recours spontané aux doigts lors de la résolution.

### **Epreuves de Post-test**

Les épreuves d'imitation motrice manuelle, de dextérité, de coordination bimanuelle ont été reconduites à l'identique en pré et en post-test.

Concernant le calcul, les 4 items pré-tests de résolution de problèmes ont été complétées par 6 problèmes à énoncés verbaux supplémentaires (pour un score de 10 incluant les 4 énoncés verbaux du TEDI-MATH proposés en pré-test) et 10 énoncés arithmétiques présentés oralement (de type «  $3 + 5$  égalent combien ? »). Pour chaque type d'énoncé (verbal ou arithmétique), 5 additions et 5 soustractions ont été proposées. Le score maximal est égal à 20.

### **Analyse des données**

Les données ont été traitées avec le logiciel JASP Version 0.12.1.0 (JASP Team (2020)). Les variables indépendantes sont le groupe expérimental (contrôle versus entraîné), le niveau d'IMM de l'élève (faible versus élevé) et le moment de passation des tests (pré et post). Le niveau d'imitation motrice manuelle (IMM faible versus élevée) est estimé à partir de la médiane du score à l'EMG calculée à partir des données du pré-test recueillies sur l'ensemble de l'échantillon. Les élèves dont le score est strictement inférieur à la médiane appartiennent au groupe d'imitation motrice manuelle faible

(IMM faible), les élèves ayant un score supérieur ou égal à la médiane appartiennent au groupe d'imitation motrice de niveau élevé (IMM élevée). Dans le groupe contrôle, 31 élèves ont un niveau IMM élevé et 27 un niveau faible. Dans le groupe entraîné, 27 élèves ont un niveau d'IMM élevé et 15 élèves ont un niveau faible. Les variables dépendantes sont le score d'imitation manuelle (EMG), la coordination bimanuelle, la dextérité, le calcul (deux mesures, la première est basée sur 4 items simples du TEDI-MATH proposés en pré et post-test ; la seconde est issue d'un ensemble d'items de résolution de problème plus complexes proposés uniquement à la fin du dispositif).

Une première analyse a été réalisée sur les mesures du pré-test pour nous assurer de l'équivalence des groupes sur les différentes variables dépendantes à l'aide d'un test t de Student pour échantillons indépendants. L'examen des variances des différents groupes et des coefficients d'asymétrie et d'aplatissement autorisent la réalisation de tests paramétriques. Une analyse de variance permet de vérifier l'impact du niveau d'imitation motrice initiale (facteur inter-sujets) sur les performances en calcul. Pour mesurer l'impact de l'entraînement, nous avons procédé à une analyse de variance à 2 (groupe contrôle vs entraîné) \* 2 (IMM faible ou élevée) \* 2 (temps de passation pré ou post) avec le groupe (contrôle vs entraîné) et le niveau d'IMM (faible vs élevée) comme facteurs inter-sujets et le temps de passation du test (pré ou post-test) comme facteur intra-sujet. Pour mesurer un impact de l'entraînement sur la capacité à résoudre des problèmes, une analyse de variance à un facteur (groupe contrôle vs entraîné) pour groupes indépendants a été réalisée. De la même façon, la mesure de l'impact du dispositif sur les composantes motrices a été réalisée à partir d'une analyse de variance à deux facteurs (groupe et niveau d'IMM) pour mesures répétées.

## Résultats

Tableau 1 : Statistique descriptive (moyenne, écart-type) des données pré et post pour l'EMG des groupes contrôle (1 ; n=58) et entraînement (2 ; n=42).

<i>groupe</i>	<i>EMG pré</i>		<i>EMG post</i>	
	1	2	1	2
<i>Moyenne</i>	9,69	9,88	9,57	10,15
<i>Ecart-type</i>	1,59	1,8	1,51	1,5

Tableau 2 : Moyennes et écart-types des mesures pré et post pour la dextérité (DEXT), la coordination motrice (COOR) en fonction du groupe contrôle (1 ; n=58) ou entraînement (2 ; n=42)

<i>Groupe</i>	<i>DEXT pré</i>		<i>DEXT post</i>		<i>COOR pré</i>		<i>COOR post</i>	
	1	2	1	2	1	2	1	2
<i>Moyenne</i>	19,08	19,4	23,8	22,11	3,74	3,5	3,83	3,93
<i>Ecart-type</i>	4,44	7,3	4,9	8,07	0,48	0,71	0,46	0,34

Tableau 3 : Moyennes et écart-types des données pré et post pour la résolution de problème (CALC) et l'utilisation des doigts au cours des calculs (DOI) pour le groupe contrôle (1 ; n=58) ou entraînement (2 ; n=42)

<i>Groupe</i>	<i>CALC pré</i>		<i>CALC post</i>		<i>DOI pré</i>		<i>DOI post</i>	
	1	2	1	2	1	2	1	2
<i>Moyenne</i>	1,2	1,55	2	2,52	1,07	1,43	0,72	1,93
<i>Ecart-type</i>	1,34	1,27	1,37	1,33	1,33	1,5	1,17	1,64

Tableau 4 : Moyennes et écart-types des données pré et post pour le score de calcul total (CALC\_TOT) et l'utilisation des doigts au cours des problèmes (DOI\_TOT) pour le groupe contrôle (1 ; n=58) ou entraînement (2 ; n=42)

<i>Groupe</i>	<i>CALC TOT</i>	<i>CALC TOT</i>	<i>DOI TOT</i>	<i>DOI TOT</i>
	1	2	1	2
<i>Moyenne</i>	7,31	10,88	4,3	9,4
<i>Ecart-type</i>	5,98	6,6	5,9	7

#### *Comparaison des groupes au pré-test*

Un test de Student pour échantillon indépendant a été réalisé sur les mesures du pré-test. Au seuil de .05, les groupes ne se différencient sur aucune des variables à l'exception de la mesure de

coordination bimanuelle ( $t(1,98) = 2,03, p=.04$ ). Le groupe entraîné présente en moyenne de moins bonnes performances avant l'entraînement que les sujets du groupe contrôle.

**Hypothèse 1 :** *Effet du niveau d'imitation motrice initiale (IMM) sur les performances en mathématiques et l'utilisation des doigts spontanées aux problèmes*

Compte tenu d'une absence de différence au pré-test sur les performances en mathématiques entre les groupes contrôle et entraîné, nous avons réalisé une analyse de variance avec le niveau d'IMM comme facteur inter-sujets. Le niveau d'imitation motrice initiale a un effet significatif modéré sur les scores aux items de calcul du pré-test ( $F(1,98)=5,3, p=.023 \eta^2 = .05$ ). Les élèves avec un niveau d'imitation motrice élevé ont significativement de meilleurs scores en calcul avant que le dispositif ne soit mis en place. Le score de recours aux doigts n'est pas significativement différent entre les groupes IMM faible et élevé ( $F(1,98)=1,7, p=.20$ ).

**Hypothèse 2 :** *Il existe un bénéfice du dispositif d'entraînement sur certaines composantes de la motricité. Les effets du groupe (contrôle versus entraîné) et du niveau d'IMM (faible versus élevé) sur les différentes mesures de motricité manuelle ont été étudiés.*

Concernant les scores gnosopraxiques (EMG), il n'est pas observé d'effet du temps de passation  $F(1,96)=1,77, p=.18$ . Il existe un effet d'interaction de faible envergure entre le temps de passation et le groupe  $F(1,96)=4,04, p=.04 \eta^2 = .006$ . Au seuil de .05, les tests post-hoc montrent que le groupe entraîné augmente significativement ses scores d'imitation manuelle motrice par comparaison au groupe contrôle. Un second effet d'interaction de faible taille est observé entre moment de passation et niveau d'IMM,  $F(1,96)= 16,9, p<.001 \eta^2 = .02$ . Au seuil de .05, les tests post-hoc indiquent que les performances des sujets de niveau IMM faible augmentent significativement entre le pré-test et le post-test tandis que les sujets qui présentaient un bon niveau d'IMM au pré-test n'augmentent pas significativement leurs performances au post-test.

Concernant la mesure de coordination bimanuelle, un effet significatif du moment de passation est observé  $F(1,96)=22,6, p <.001 \eta^2 = .06$  qui traduit une augmentation générale et modérée des performances en coordination. L'interaction entre le temps de passation et le groupe est

significative et de faible envergure,  $F(1,96)=10,57, p = .002 \eta^2 = .03$ . Les tests post-hoc de Tuckey indiquent que le groupe entraîné augmente significativement sa coordination bimanuelle entre le pré- et le post-test alors que ce n'est pas le cas pour le groupe contrôle.

La dextérité s'améliore modérément pour l'ensemble des élèves entre les deux temps de passation,  $F(1,96)=60,82, p < .001 \eta^2 = .08$ . Au seuil de .05, il n'est pas observé d'effet de la motricité ou du groupe. On note cependant, une tendance à l'interaction entre le temps de passation et le groupe  $F(1,96)=3,19, p < .08 \eta^2 = .02$ , les tests post-hoc réalisés indiquent que l'augmentation des performances en dextérité est plus sensible pour les élèves du groupe contrôle.

***Hypothèse 3 : Effet du groupe et du niveau d'imitation motrice initiale sur les performances en calcul et l'usage des doigts.***

Le score de calcul basé sur les items du TEDI-MATH qui ont été proposés au pré-test et au post-test a fait l'objet d'une analyse de variance à mesures répétées. Un effet significatif et modéré est observé pour le temps de passation  $F(1,96) = 36,9, p < .001 \eta^2 = .08$  qui indique une amélioration des performances aux 4 items de résolution pour l'ensemble des élèves. Au seuil de .05, aucun autre effet significatif n'est enregistré. L'analyse de variance appliquée aux scores d'utilisation spontanée des doigts lors de la résolution des 4 items ne montre pas d'effet du temps de passation au seuil de .05, mais un effet d'interaction significatif et faible entre le temps de passation et le groupe  $F(1,96)= 4,36, p = .04 \eta^2 = .01$  qui indique que le groupe entraîné utilise en moyenne plus souvent les doigts au cours du post-test que le groupe contrôle. Il est observé aussi une tendance à l'interaction entre le temps de passation et le niveau d'IMM  $F(1,96)= 3.31, p = .07 \eta^2 = .01$  de faible taille, les tests post-hoc permettent de comprendre que ce sont les enfants avec un niveau d'IMM élevé qui tendent le plus à augmenter le recours aux doigts entre le pré-test et le post-test comparativement aux enfants avec un faible niveau d'IMM.

L'analyse de variance réalisée sur le score total de calcul (20 items de résolution de problème) révèle un effet significatif et de faible taille du groupe  $F(1,96) = 4.95, p = .03, \eta^2 = .04$ . La figure 1 indique que le groupe entraîné présente des scores de calcul significativement meilleurs. Il est noté aussi un effet modéré de l'IMM  $F(1,96) = 8.37, p = .005, \eta^2 = .07$ , les élèves avec un niveau d'IMM élevé au début de l'étude présentent globalement des scores significativement meilleurs en calcul. Finalement, une tendance à l'interaction de faible taille entre ces deux facteurs  $F(1,96) = 3.11, p = .08, \eta^2 = .03$  est observée. L'effet de l'entraînement tend à se différencier selon le niveau d'IMM initial des élèves. Concernant le score global de calcul, la figure 2 montre que les élèves à faible niveau d'imitation motrice profitent peu de l'entraînement comparativement aux élèves à niveau élevé.

[Insérer figure 1]

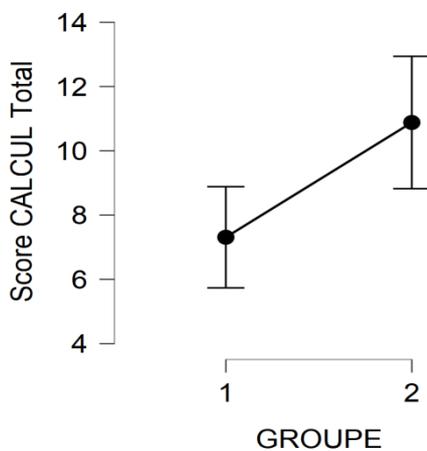


Figure 1: Effet du facteur groupe (contrôle : 1 versus entraîné : 2) sur le score de calcul total. Les barres d'erreur indiquent les intervalles de confiance à 95%.

[insérer figure 2]

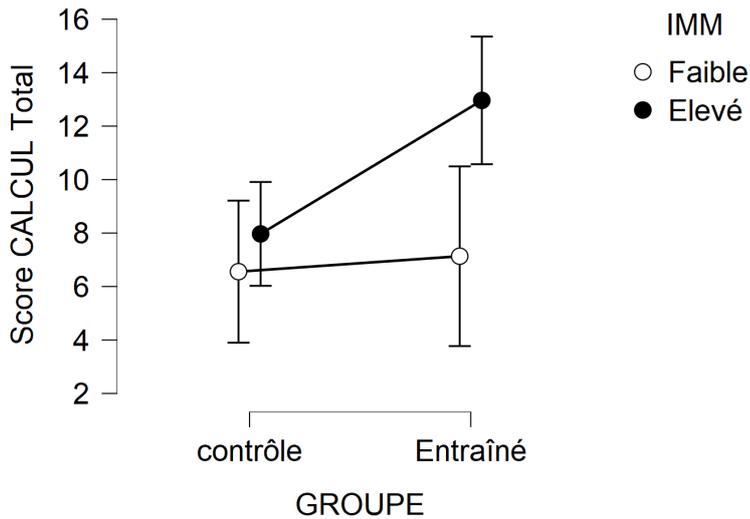


Figure 2 : Tendence à l'interaction entre le facteur groupe (contrôle= 1 ; entraîné = 2) et le facteur IMM (Faible = 1 ; élevé =2) pour la variable score de calcul total. Les barres d'erreur indiquent les intervalles de confiance à 95%.

Une analyse de variance réalisée sur le score de recours aux doigts en situation de calcul montre un effet simple de taille modéré du groupe  $F(1,96)=11.7, p < .001, \eta^2 = .10$  ainsi qu'une tendance à l'interaction de faible taille entre le facteur groupe et le facteur d'IMM  $F(1,96)=3.07, p = .08, \eta^2 = .03$ . La figure 3 indique que si l'ensemble des enfants entraînés utilise significativement plus leurs doigts que les enfants du groupe contrôle, l'effet est accentué pour ceux qui présentent un niveau d'IMM élevé.

[insérer figure 3]

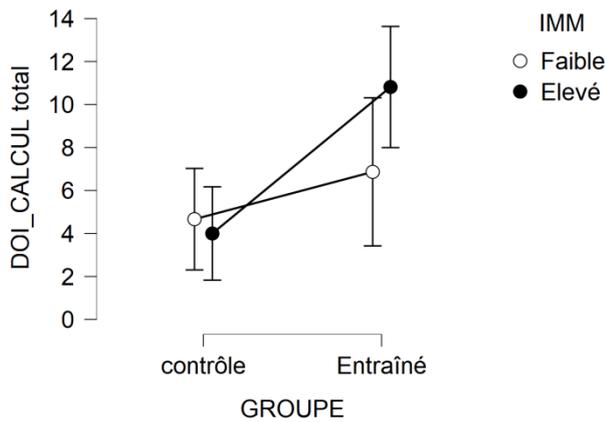


Figure 3 : Tendence à l'interaction entre le facteur groupe (contrôle= 1 ; entraîné = 2) et le facteur IMM (Faible = 1 ; élevé =2) pour la variable recours aux doigts. Les barres d'erreur indiquent les intervalles de confiance à 95%.

### Discussion

De nombreuses études ont alimenté l'idée selon laquelle les doigts pourraient jouer un rôle déterminant (Lafay, Thevenot, Castel & Fayol, 2013) voire fondamental (Butterworth, 1999) dans l'installation des habiletés de calcul. Certaines d'entre elles s'appuient sur l'hypothèse d'une cognition numérique incarnée et située (Andres, Michaux & Pesenti, 2012 ; Lakoff & Nuñez, 2000). En adoptant cette perspective, de nombreuses recherches ont montré que des performances en motricité fine étaient prédictives de performances en mathématiques (Asakawa & Sugimura, 2009 ; 2011 ; Fischer et al., 2020 ; Luo et al., 2006 ; Suggate et al., 2017). Le rôle de la dextérité a été examiné dans plusieurs études (Asakawa & Sugimura, 2009 ; 2011 ; Asakawa et al., 2017 ; Fischer et al., 2020 ; Gracia-Bafalluy & Noël, 2008). En revanche, les capacités d'imitation motrice de mouvements de mains par de jeunes enfants, qui nécessitent des capacités d'observation et d'organisation du geste n'ont jusqu'à présent pas été étudiées dans le cadre des habiletés numériques ou arithmétiques. Cette capacité d'imitation motrice est pourtant requise lors de l'acquisition d'une nouvelle habileté manuelle. L'installation d'une nouvelle habileté manuelle comme le calcul sur les doigts nécessite du temps et un apprentissage implicite et/ou explicite, elle dépend par conséquent des occasions d'action qui sont offertes à l'enfant d'exercer cette habileté

(Goodway et al., 2003 ; Bril, 2002) et de l'imiter (Andres & Pesenti, 2015 cités par Martzog & Stoeger, 2020). Suite à ces constats et aux recommandations de certains auteurs d'enseigner explicitement l'usage des doigts (Jordan & Levine, 2009 ; Lafay et al., 2013) et d'entraîner la motricité fine (Asakawa et al., 2019 ; Fischer et al., 2020 ; Ollivier et al., 2019), nous avons souhaité vérifier que tous les enfants, quelle que soit leur capacité d'imitation motrice manuelle, pouvaient progresser en calcul suite à ce type d'entraînement.

Notre première hypothèse supposait que les enfants avec de bonnes capacités d'imitation motrice manuelle au pré-test montreraient de meilleures performances initiales en résolution de problème. Cette hypothèse est confirmée puisque les sujets avec des capacités d'imitation motrice manuelle élevées au début de l'étude présentent des performances modérément et significativement meilleures en calcul tandis que les capacités d'imitation motrice ne permettent pas de distinguer les enfants sur leur recours spontané aux doigts lors du calcul. Ce dernier résultat pourrait s'expliquer par le faible degré de difficulté des items choisis au pré-test. Alors que la gnose digitale et la dextérité ont été associées dans diverses études à de meilleures performances en mathématiques, ce résultat contribue à la compréhension des relations entre motricité et mathématiques, en montrant que l'imitation motrice de gestes manuels impliquant observation, planification, exécution et coordination, est aussi une capacité associée à de meilleures performances en calcul.

En deuxième lieu, nous souhaitons examiner l'effet de notre dispositif sur les différentes composantes de la motricité manuelle (imitation de mouvements de mains, dextérité, coordination bimanuelle). Les analyses indiquent que si l'on considère l'ensemble de l'échantillon, comprenant donc les deux groupes, on ne mesure pas d'évolution significative de l'imitation motrice manuelle (mesurée par l'EMG) entre le pré-test et le post-test. Par contre, si l'on considère uniquement le groupe entraîné (soit la moitié de l'effectif total), on mesure une augmentation significative mais faible du score d'EMG au post-test. Les analyses complémentaires indiquent que seuls les enfants

ayant un niveau faible d'IMM (n=15), ont significativement mais faiblement progressé à l'EMG. Il est permis de penser que ce résultat traduit un effet d'apprentissage lié à notre dispositif expérimental en faveur des enfants d'IMM faible.

De façon inattendue, la dextérité n'a pas évolué de façon significative pour le groupe entraîné et au contraire le groupe contrôle tend à avoir de meilleurs résultats au post-test. Notre programme, centré sur de multiples composantes de la motricité, a possiblement accordé moins de temps à la dextérité que ne l'a fait le groupe contrôle, ce qui pourrait expliquer cette absence d'effet en contradiction avec les travaux d'autres chercheurs (Asakawa et al., 2013). Finalement, il a été observé un bénéfice positif du programme sur la coordination bimanuelle puisque les enfants du groupe entraîné qui présentaient des performances plus faibles au départ, rattrapent et dépassent les performances du groupe contrôle mais l'analyse de la taille des effets indique que les progrès enregistrés sont de faible ampleur.

En résumé, concernant le domaine de la motricité manuelle, le programme a permis spécifiquement des progrès dans les domaines de l'imitation motrice de geste manuel et de la coordination bimanuelle mais l'analyse des tailles d'effet indique que les progrès moteurs s'installent lentement. Ce résultat est conforme à ceux de Annett, et al. (1974), qui, après un entraînement de quatre semaines à une tâche unimanuelle réalisée sur chaque main par des adultes observe que la réduction d'écart de performances entre les deux mains est longue à obtenir.

Finalement, nous avons supposé qu'un programme préscolaire d'enseignement recouvrant différentes composantes motrices nécessaires à l'installation d'une habileté de calcul sur les doigts associé aux principes d'un enseignement explicite de l'usage des doigts en mathématiques apporterait un bénéfice significatif comparativement à un enseignement classique. Cependant, nous avons aussi évoqué la possibilité que les effets positifs de l'entraînement soient modulés par les capacités initiales des jeunes enfants à observer et reproduire des gestes manuels.

La mesure de calcul basée sur les items du TEDI-MATH n'a pas permis de différencier les deux groupes qui progressent de façon non différente entre le pré et le post-test. Ce résultat peut s'expliquer par la nature des items choisis. Ces items peu complexes (deux additions et deux soustractions sous forme d'énoncé verbal) comportaient trois items simples à résoudre (*i.e.* résultat égal ou inférieur à 5) grâce à la maîtrise d'une stratégie optimale : comptage verbal, décomposition ou faits arithmétiques simples (Carpenter et Moser, 1984). L'entraînement de la motricité fine et l'apprentissage du recours aux doigts pourraient ne pas apporter de bénéfice particulier pour la résolution d'opérations simples. On note cependant des modifications qualitatives des procédures employées suite à l'entraînement puisque les enfants du groupe entraîné recourent plus fréquemment aux doigts pour résoudre ces items que les enfants du groupe contrôle à l'issue du dispositif. A la fin du dispositif, ce premier test composé de 4 items a été complété par des items plus complexes proposés à la fin de l'entraînement (*i.e.*, additions et soustractions sous forme de résolutions de problèmes verbaux et d'énoncés arithmétiques avec des résultats inférieurs et supérieurs à 10). Avec un test plus complexe, les résultats indiquent que les enfants du groupe entraîné finissent avec des performances significativement meilleures qui s'accompagnent d'un recours aux doigts significativement plus fréquent. Finalement, le fait que les enfants entraînés aient eu un recours aux doigts plus fréquemment sur les 4 items simples du TEDI-MATH sans dépasser les scores des élèves du groupe contrôle pourrait signifier qu'une nouvelle procédure de résolution des problèmes a été expérimentée et est venue enrichir le répertoire de stratégies disponibles. Ultérieurement confrontés à des items plus complexes, la disponibilité de cette procédure permettrait aux enfants d'être en réussite. Un entraînement à certaines composantes de motricité manuelle associé à un enseignement explicite sur le recours aux doigts en mathématiques s'est traduit par des performances significativement meilleures en calcul au cours de problèmes à énoncés verbaux et arithmétiques par comparaison aux élèves qui ont bénéficié d'un programme scolaire classique. L'effet positif de cet entraînement manuel sur les performances en calcul

confirme les résultats obtenus dans d'autres recherches (Asakawa et al., 2017 ; Ollivier et al., 2019) mais non ceux obtenus par Schild et al. (2020). Selon ces derniers auteurs, ces différences entre études pourraient être liées à la nature des interventions ou encore à l'âge et à l'expérience des participants. A partir des propositions d'Asakawa et al. (2017), les raisons des progrès observés pourraient tenir au fait que l'entraînement de la motricité fine a permis une augmentation de la connaissance incarnée du nombre (Suggate, Stoeger, & Fischer, 2017), ou que des zones cérébrales communes aux compétences motrices et arithmétiques ont été sollicitées et renforcées (Barsalou, 1999 ; Penner-Wilger & Anderson, 2013). Les exercices proposés ont pu aussi contribuer à développer l'efficacité des fonctions exécutives, ce qui en retour faciliterait l'acquisition des capacités arithmétiques (Diamond, 2000). Cependant dans notre étude, l'absence d'amélioration en dextérité associée à une amélioration significative des capacités d'imitation motrice manuelle et de coordination manuelle du groupe entraîné offre des perspectives nouvelles d'interprétation et d'investigation des relations entre usage des doigts et réussite en calcul. En entraînant les enfants à mieux coordonner leurs mouvements et en renforçant l'indépendance des membres effecteurs, le dispositif a possiblement permis de diminuer la charge cognitive (Bara & Tricot, 2017) qu'implique la coordination des deux mains lorsque les doigts sont utilisés pour résoudre une situation arithmétique. Cette diminution de la charge inhérente à la coordination motrice pourrait expliquer que l'usage des doigts en situation bimanuelle soit devenu plus fréquent et plus efficace chez les enfants entraînés. L'amélioration des capacités d'imitation motrice manuelle témoigne du fait que le dispositif a accentué le développement des capacités d'observation et de reproduction d'un modèle externe. L'observation et l'intention d'imiter une action observée font appel à un mécanisme d'imagerie motrice (Jeannerod & Decety, 1995). Une fois disponible, cette imagerie mentale motrice permet de préparer ou de simuler des actions réelles. Autrement dit, et en adoptant une perspective incarnée, ces simulations motrices pourraient être une voie d'accès facilitante aux représentations dynamiques des transformations d'état face à un problème arithmétique.

L'imagerie motrice émerge entre 5 et 7 ans (Guilbert et al., 2013), période décisive pour la construction du nombre et les premières habiletés arithmétiques, mais à cet âge, seuls 60% des enfants accèdent à une imagerie mentale motrice et celle-ci reste sous l'étroite dépendance des capacités motrices du jeune enfant (Funck et al., 2005). Ainsi, en soutenant les différentes composantes de la motricité manuelle durant 12 semaines, notre dispositif pourrait avoir facilité la mise en œuvre et/ou le recours au mécanisme d'imagerie motrice. Des études complémentaires associant une mesure de l'imagerie motrice mentale (Puyjarinet, SoppelsaConnan, 2020) devrait permettre de mieux comprendre les relations entre imagerie motrice mentale, capacité d'imitation motrice et usage des doigts en calcul. En considérant le niveau d'imitation motrice initiale des enfants entraînés, nous avons aussi montré que ce sont les enfants avec un niveau d'IMM initial élevé qui tendent à améliorer le plus leur performance en calcul. Les enfants avec un IMM faible recourent plus fréquemment aux doigts pour résoudre des problèmes mais leur performance finale en calcul n'est pas différente du groupe contrôle. Martzog & Suggate (2019) ont montré que chez les enfants âgés de 3 à 10 ans, l'imagerie mentale motrice dépend de la maturité et des performances du système sensori-moteur mais supposent qu'en retour, l'imagerie mentale pourrait affecter les habiletés de motricité fine particulièrement durant les phases d'apprentissage au cours desquelles la visualisation mentale des mouvements pourrait faciliter la planification et l'exécution de nouveaux mouvements. Cette interdépendance entre maturité motrice manuelle et imagerie mentale motrice pourrait avoir facilité l'apprentissage chez les élèves ayant déjà développé des capacités d'imitation motrice manuelle. Au contraire, certains enfants, présentant un niveau d'imitation initial faible, ont progressé plus lentement. Notre étude ne permet pas d'expliquer les raisons de ces différences interindividuelles importantes déjà constatées par ailleurs (Blondis et al., 1993). Des contraintes neuro-motrices (*i.e.* maturation du corps calleux et des aires frontales) pourraient être à l'origine de ces différences (Fagard, 2001) et si un entraînement peut agir sur ces

contraintes (Provins & Glencross, 1968), on sait aussi que les modifications sont lentes à obtenir, au moins chez l'adulte (Annett et al., 1973).

### *Limites et perspectives*

Si les résultats de cette étude encouragent la mise en œuvre de dispositifs pédagogiques ciblant les différentes composantes de la motricité manuelle, il nous semble cependant qu'il aurait fallu un groupe contrôle actif pour que les comparaisons soient plus aisées à interpréter. Notre dispositif, bien que perfectible sur le plan de la dextérité, s'est traduit par une amélioration de l'entrée dans le calcul mais un temps d'accompagnement plus long aurait peut-être été bénéfique aux enfants qui présentaient au départ un IMM faible. Ces résultats devraient encourager les professionnels de la petite enfance à concevoir une écologie d'apprentissage qui permette d'accompagner le développement de la motricité manuelle du jeune enfant dans toutes ces composantes. Pour les professionnels, il s'agira de multiplier les occasions données aux enfants d'exercer leur visuo-motricité et leur coordination manuelle, de renforcer leur musculature des doigts, d'observer et d'imiter des mouvements manuels (sans nécessairement que ceux-ci symbolisent des quantités ou des transformations) et cela en veillant systématiquement à solliciter chacune des mains. En effet, la motricité manuelle recouvre de nombreuses composantes et ne devrait pas être limitée à la visuo-motricité (encore appelée dextérité) ou au renforcement des muscles des doigts.

Finalement, il nous semble que cette contribution ouvre des perspectives de recherche nouvelles sur les relations entre imagerie mentale motrice, capacité de motricité fine et habileté arithmétique. Des études menées dans un cadre plus expérimental devraient permettre de préciser les relations entre imagerie mentale motrice, motricité manuelle et habileté arithmétique. De ce point de vue, des mesures de motricité fine initiales complémentaires auraient permis de savoir si les enfants avec un niveau d' IMM faible présentaient aussi un développement sensori-moteur moins avancé, ce qui permettrait de mieux comprendre les relations qu'entretiennent les capacités d'imitation motrice et le développement sensori-moteur de l'enfant.

[Les auteurs déclarent ne pas avoir de liens d'intérêts.]

## Références

Andres, M., Michaux, N., & Pesenti, M. (2012). Common substrate for mental arithmetic and finger representation in the parietal cortex. *NeuroImage*, 62, 1520–1528. <http://dx.doi.org/10.1016/j.neuroimage.2012.05.047>

Annett, M., Hudson, P. T. W., & Turner, A. (1974). The reliability of differences between the hands in motor skill. *Neuropsychologia*, 12(4), 527–531. doi:10.1016/0028-3932(74)90083-9

Asakawa, A., Murakami, T., & Sugimura, S. (2017). Effect of fine motor skills training on arithmetical ability in children. *European Journal of Developmental Psychology*, 16(3), 290–301. doi:10.1080/17405629.2017.1385454

Asakawa, A., & Sugimura, S. (2009). The relationship between finger dexterity and numerical abilities of young children. *Japanese Journal of Developmental Psychology*, 20, 243–250. (In Japanese with English abstract.)

Asakawa, A., & Sugimura, S. (2011). The specific relationship between numerical abilities and finger dexterity in early childhood. *Japanese Journal of Developmental Psychology*, 22, 130–139. (In Japanese with English abstract.)

Asakawa, A., & Sugimura, S. (2014). Developmental trajectory in the relationship between calculation skill and finger dexterity: A longitudinal study. *Japanese Psychological Research*, 56(2), 189–200. doi:10.1111/jpr.12041

Bara, F., & Tricot, A. (2017). Le rôle du corps dans les apprentissages symboliques: apports des théories de la cognition incarnée et de la charge cognitive [The role of the body in symbolic learning: contributions of theories of embodied cognition and cognitive load]. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01889164/>

Barsalou, L. W. (2008). Grounded Cognition. *Annual Review of Psychology*, 59(1), 617–645. doi:10.1146/annurev.psych.59.103006.093639

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. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2012.05.005>.

Bianco, M., & Bressoux, P. (2009). Chapitre 2. Effet-classe et effet-maître dans l'enseignement primaire: vers un enseignement efficace de la compréhension [Class effect and teacher effect in primary education: towards effective teaching of understanding]. *L'efficacité dans l'enseignement: Promesses et zones d'ombre*, 35-54.

Blondis, T. A., Snow, J. H., Roizen, N. J., Opacich, K. J., & Accardo, P. (1994). Early Maturation of Motor-Delayed Children at School Age. *Pediatric Physical Therapy*, 6(4), 220. doi:10.1097/00001577-199400640-00020

Bonneton-Botté, N., Hili, H., De La Haye, F., & Noël, Y. (2015). Dessin de la main et habiletés numériques chez des enfants d'âge préscolaire. *Canadian Journal of Behavioural Science / Revue Canadienne Des Sciences Du Comportement*, 47(3), 207–215. doi:10.1037/a0039037

Bril, B. (2002). Apprentissage et contexte. *Intellectica*. Revue de l'Association Pour La Recherche Cognitive, 35(2), 251–268. doi:10.3406/intel.2002.1669

Butterworth, B. (1999). *The mathematical brain*. London : Mac Millan.

Butterworth, B. (2005). The development of arithmetical abilities. *Journal of Child Psychology and Psychiatry*, 46(1), 3–18. doi:10.1111/j.1469-7610.2004.00374.x

Carpenter, T. P., & Moser, J. M. (1984). The Acquisition of Addition and Subtraction Concepts in Grades One through Three. *Journal for Research in Mathematics Education*, 15(3), 179. doi:10.2307/748348

Diamond, A. (2000). Close Interrelation of Motor Development and Cognitive Development and of the Cerebellum and Prefrontal Cortex. *Child Development*, 71(1), 44–56. doi:10.1111/1467-8624.00117

Dupont-Boime, J., & Thevenot, C. (2018). High working memory capacity favours the use of finger counting in six-year-old children. *Journal of Cognitive Psychology*, 30(1), 35–42. <https://doi.org/10.1080/20445911.2017.1396990>.

Fagard, J. (2000). Le développement des habiletés manuelles. In J. Rivière (Ed.). *Le développement psychomoteur du jeune enfant* (pp. 109-150). Marseille : Solal Editeur.

Fagard, J., Hardy-Léger, I., Kervella, C., & Marks, A. (2001). Changes in interhemispheric transfer rate and the development of bimanual coordination during childhood. *Journal of experimental child psychology*, 80(1), 1-22.

Fischer, U., Suggate, S. P., & Stoeger, H. (2020). The Implicit Contribution of Fine Motor Skills to Mathematical Insight in Early Childhood. *Frontiers in Psychology*, 11. doi:10.3389/fpsyg.2020.01143

Funk, M., Brugger, P., & Wilkening, F. (2005). Motor processes in children's imagery: The case of mental rotation of hands. *Developmental Science*, 8(5), 402-408. <https://doi.org/10.1111/j.1467-7687.2005.00428.x>

Fuson, K. C. (1998). Pedagogical, mathematical, and real-world conceptual-support nets: a model for building children's multidigit domain knowledge. *Mathematical Cognition*, 4(2), 147–186. <https://doi.org/10.1080/135467998387370>

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(5), 662–668. <https://doi.org/10.1111/j.1467-7687.2008.00715.x>.

Gallistel, C. R., & Gelman, R. (1992). Preverbal and verbal counting and computation. *Cognition*, 44(1-2), 43–74. doi:10.1016/0010-0277(92)90050-r

Geary, D. C. (2007). An Evolutionary Perspective on Learning Disability in Mathematics. *Developmental Neuropsychology*, 32(1), 471–519. doi:10.1080/87565640701360924

- Goodway, J. D., Crowe, H., & Ward, P. (2003). Effects of Motor Skill Instruction on Fundamental Motor Skill Development. *Adapted Physical Activity Quarterly*, 20(3), 298–314. doi:10.1123/apaq.20.3.298
- Gracia-Bafalluy, M., & Noël, M.P. (2008). Does finger training increase young children's numerical performance? *Cortex*, 44, 4, p. 368-75. Doi: 10.1016/j.cortex.2007.08.020
- Guedin, N., Thevenot, C., & Fayol, M. (2018). Des doigts et des nombres [fingers and numbers]. *Psychologie Française*, 63(4), 379–399. doi:10.1016/j.psfr.2017.07.001
- Guilbert, J., Jouen, F., Lehalle, H., & Molina, M. (2013). Imagerie motrice interne et simulation de l'action chez l'enfant [Internal motor imaging and simulation of action in children]. *L'Année psychologique*, 113(3), 459-488.
- JASP Team (2020). JASP (Version 0.12.1.0)[Computer software]. Retrieved from <https://jasp-stats.org/>
- Jeannerod, M. (2001). Neural Simulation of Action: A Unifying Mechanism for Motor Cognition. *NeuroImage*, 14(1), S103–S109. doi:10.1006/nimg.2001.0832
- Jeannerod, M., & Decety, J. (1995). Mental motor imagery: a window into the representational stages of action. *Current Opinion in Neurobiology*, 5(6), 727–732. doi:10.1016/0959-4388(95)80099-9
- Krauthausen, G., & Scherer, P. (2007). Inhaltsbereiche. Einführung in Die Mathematikdidaktik [Introduction to Didactics of Mathematics], 6–108. doi:10.1007/978-3-662-44964-6\_1
- Lafay, A., Thevenot, C., Castel, C., & Fayol, M. (2013). The role of fingers in number processing in young children. *Frontiers in psychology*, 4, 488. doi:10.3389/fpsyg.2013.00488
- Lakoff, G., & Núñez, R. E. (2000). *Where mathematics come from: How the embodied mind brings mathematics into being*. New York, NY: Basic Books.
- Long, I., Malone, S. A., Tolan, A., Burgoyne, K., Heron-Delaney, M., Witteveen, K., et al. (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. doi:10.1016/j.jecp.2016.08.005
- 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*, 46(4), 1079–1087. <https://doi.org/10.3758/s13428-014-0447-1>.

- Luo, Z., Jose, P. E., Huntsinger, C. S., & Pigott, T. D. (2007). Fine motor skills and mathematics achievement in East Asian American and European American kindergartners and first graders. *British Journal of Developmental Psychology*, 25, 595–614. doi:10.1348/026151007X185329
- Marinthe, C., Fayol M., & Barrouillet, P. (2001). Gnosies digitales et développement des performances arithmétiques [Digital Gnosies and development of arithmetic performance]. In A. Van Hout, C. Meljac et JP. Fischer (eds), *Troubles du calcul et dyscalculies chez l'enfant*. Paris : Masson (pp. 239-254).
- Martzog, P., Stoeger, H., & Suggate, S. (2019). Relations between Preschool Children's Fine Motor Skills and General Cognitive Abilities. *Journal of Cognition and Development*, 20(4), 443–465. doi:10.1080/15248372.2019.1607862
- Martzog, P., & Suggate, S. P. (2019). Fine motor skills and mental imagery: Is it all in the mind? *Journal of Experimental Child Psychology*, 186, 59–72. doi:10.1016/j.jecp.2019.05.002
- Moeller, K., Martignon, L., Wessolowski, S., Engel, J., & Nuerk, H.-C. (2011). Effects of Finger Counting on Numerical Development ? The Opposing Views of Neurocognition and Mathematics Education. *Frontiers in Psychology*, 2. doi:10.3389/fpsyg.2011.00328
- Newell, K. M. (1986). Constraints on the Development of Coordination. *Motor Development in Children: Aspects of Coordination and Control*, 341–360. doi:10.1007/978-94-009-4460-2\_19
- Newman, S. D. (2016). Does finger sense predict addition performance? *Cognitive Processing*, 17(2), 139–146. <https://doi.org/10.1007/s10339-016-0756-7>.
- Ollivier, F., Noël, Y., Legrand, A., & Bonneton-Botté, N. (2019). A teacher-implemented intervention program to promote finger use in numerical tasks. *European Journal of Psychology of Education*, 35(3), 589–606. doi:10.1007/s10212-019-00441-9
- 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(DEC), 1–9. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2013.00877>

- Pitchford, N.J., Papini, C., Outhwaite, L.A., Gulliford, A. (2016). Fine Motor Skills Predict Maths Ability Better than They Predict Reading Ability in the Early Primary School Years. *Frontiers in Psychology* 7(783). doi: 10.3389/fpsyg.2016.00783
- Provins, K. A., & Glencross, D. J. (1968). Handwriting, typewriting and handedness. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 20(3), 282–289. doi:10.1080/14640746808400162
- Puyjarinet, F., Soppelsa, R. et Connan, J.-F. (2020). Le test d'imagerie motrice implicite (TIMI-1) : standardisation et étalonnage chez des enfants de 7 à 11 ans. *A.N.A.E. : Approche neuropsychologique des apprentissages chez l'enfant*, 167 : 480-494.
- Reeve, R., & Humberstone, J. (2011). Five-to 7-year-olds' finger gnosis and calculation abilities. *Frontiers in Psychology*, 2, 359. doi:10.3389/fpsyg.2011.00359
- Sato, M., & Lalain, M. (2008). On the relationship between handedness and hand-digit mapping in finger counting. *Cortex*, 44, 393–399. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2007.08.005>.
- Schild, U., Bauch, A., & Nuerk, H.-C. (2020). A Finger-Based Numerical Training Failed to Improve Arithmetic Skills in Kindergarten Children Beyond Effects of an Active Non-numerical Control Training. *Frontiers in Psychology*, 11. doi:10.3389/fpsyg.2020.00529
- Seron X., Crollen, V. (2018). Le comptage sur les doigts comme support au développement des capacités numériques et arithmétiques [Finger counting as a support for the development of numerical and arithmetic capabilities]. *Approche neuropsychologique des apprentissages chez l'enfant*, 156, 531-537.
- Siegler, R. S., & Shrager, J. (1984). Strategies choices in addition and subtraction: how do children know what to do? In C. Sophian (Ed.), *Origins in cognitive skills* (pp. 229–293). Hillsdale: Lawrence Erlbaum Associates.
- Smits-Engelsman, B., & Duysens, J. (2008). The line copy task for kinesthesia and internal movement representation: Application in children. *Human Movement Science*, 27(5), 682–694. doi:10.1016/j.humov.2008.03.005

Suggate, S., & Stoeger, H. (2017). Fine Motor Skills Enhance Lexical Processing of Embodied Vocabulary: A Test of the Nimble-Hands, Nimble-Minds Hypothesis. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 70(10), 2169–2187. doi:10.1080/17470218.2016.1227344

Suggate, S., Stoeger, H., & Fischer, U. (2017). Finger-Based Numerical Skills Link Fine Motor Skills to Numerical Development in Preschoolers. *Perceptual and motor skills*, 124(6), 1085-1106. doi:10.1177/0031512517727405

Vaivre-Douret, L. (2010). *Évaluation de la motricité gnosopraxique distale (EMG): adaptation du test d'imitation de gestes de Bergès-Lézine*. Pearson.

Van Nieuwenhoven, C., Grégoire, J., Noël, M. P. (2001). *Tedi-Math. Test diagnostique des compétences de base en mathématiques*. Paris, France: ECPA.

Versace, R., Brouillet, D., & Vallet, G. (2018). *Cognition incarnée: Une cognition située et projetée*. Mardaga.

Wallon, H., & Denjean, G. (1962). *Activité simultanée et similaire des deux mains chez les droitiers et les gauchers*. Presses universitaires de France.

Wasner, M., Nuerk, H. C., Martignon, L., Roesch, S., & Moeller, K. (2016). Finger gnosis predicts a unique but small part of variance in initial arithmetic performance. *Journal of experimental child psychology*, 146, 1-16. doi:10.1016/j.jecp.2016.01.006