Université de Lille
FACULTÉ DE MÉDECINE Henri Warembourg
Département d'Orthophonie Gabriel DECROIX

MEMOIRE

En vue de l'obtention du

Certificat de Capacité d'Orthophoniste

présenté par

Marie FALLON

soutenu publiquement en juin 2019

La représentation numérique des petites quantités chez l'enfant

Impact du format de présentation des stimuli sur le traitement de la magnitude

MEMOIRE dirigé par

Sandrine MEJIAS, Maître de conférences, Université Lille

Sébastien VANSTAVEL, Doctorant, Université Lille

Lille – **2019**

Remerciements

Je souhaite remercier ici tous ceux qui ont participé à la réalisation de ce projet et, de façon plus générale, m'ont accompagnée durant ces dernières années.

En premier lieu, je souhaite remercier mes directeurs de mémoire, Sandrine Mejias et Sébastien Vanstavel, pour leur disponibilité, leur confiance et leurs conseils tout au long de cette étude.

Je remercie la directrice de l'école primaire ainsi que les institutrices pour leur accueil bienveillant et compréhensif face aux contre-temps successifs. Je souhaite exprimer ma reconnaissance envers les parents qui ont accepté de me confier leurs enfants sur le temps scolaire. Je remercie bien évidemment les participants pour leur implication et leur sérieux à chaque étape de l'expérimentation.

Je tiens également à remercier mes maîtres de stage qui m'ont accueillie au cours de ces cinq années et qui m'ont guidée dans l'apprentissage du métier et la construction de mon identité professionnelle. Je souhaite en particulier adresser toute ma gratitude à Pascale Dabas par qui j'ai pu découvrir cette profession.

Enfin, je remercie mes proches pour leur soutien et leurs encouragements durant ces huit dernières années.

Résumé :

Depuis ces dernières décennies, le domaine de la cognition mathématique intéresse particulièrement les chercheurs qui tentent d'identifier les mécanismes mobilisés dans le traitement des quantités. Certains se sont interrogés sur le rôle que pouvaient jouer les doigts dans le développement des mathématiques, sans parvenir à un consensus. Notre étude vise donc à apporter des éléments de réponse supplémentaires permettant de se positionner quant à l'utilisation des doigts et leur pertinence dans la maîtrise des mathématiques.

Pour tenter de répondre à cette question, nous avons élaboré un protocole expérimental afin d'évaluer les compétences arithmétiques et les gnosies digitales. Une tâche informatisée de jugement d'égalité complète ce protocole et vise à étudier l'efficacité du support digital par rapport à d'autres présentations dans le traitement des quantités. Ces différents tests ont été proposés à des enfants scolarisés en classe préparatoire qui débutent les apprentissages mathématiques formels.

Les résultats obtenus à la tâche expérimentale, qui oppose la présentation de doigts, à celle de chiffres arabes et de points, indiquent que chez nos enfants, le traitement des petites quantités n'est pas particulièrement facilité par l'affichage préalable des configurations de doigts correspondantes. A l'exception des magnitudes « un » et « cinq », les chiffres arabes présentés en amorce permettent un traitement plus exact des quantités.

Toutefois, ces résultats ne suffisent pas pour affirmer ou réfuter la pertinence de l'utilisation des doigts comme support au développement des compétences mathématiques. D'autres investigations sont donc nécessaires pour avancer sur cette question.

Mots-clés :

Cognition mathématique, gnosies digitales, enfants.

Abstract :

For these last decades, the domain of mathematical cognition interests particularly the researchers who try to identify mechanisms mobilised in the treatment of quantities. Some people wondered about the role which fingers in the development of mathematics could play, without reaching a consensus. Our study aims therefore at bringing additional elements of answer allowing to position as for the use of fingers and their pertinence in the mastery of mathematics

To try to answer this question, we worked out an experimental protocol assess arithmetical competences and digital gnosias. A computerised task of judgement of complete equality this protocol and aims at studying the effectiveness of the digital support in comparison with other presentations in the treatment of quantities. These different tests were offered to children sent to school in preparative class which start definite mathematical trainings.

Results got in the experimental task, which compares the presentation of fingers, to that of Arabic numerals and of points, point out that at our children, the treatment of small quantities is not particularly made easier by the prior display of the corresponding shapes of fingers. Except for magnitudes one and "five", Arabic numerals introduced in detonator allow a more accurate treatment of quantities.

However, these results are not sufficient to assert or to refute the relevance of the use of fingers as a support for the development of mathematical skills. Further investigations are therefore necessary to advance on this issue.

Keywords :

Numerical cognition, digital gnosia, children

Table des matières

Introduction

Dans notre quotidien, la notion de quantité est omniprésente et s'exprime sous plusieurs formes : chiffres arabes, symboles ou encore noms de nombre prononcés à l'oral ou écrits. A l'âge adulte, nous parvenons à traiter et à manipuler ces différentes représentations sans difficultés. Pour y parvenir, un apprentissage est nécessaire, à la fois implicite au travers de situations dans la vie de tous les jours et explicite dans le cadre des enseignements scolaires. Avant même l'utilisation des chiffres arabes ou de la forme verbale, qui constituent des codes abstraits, les enfants utilisent leurs doigts pour se représenter les numérosités (Butterworth, 1999). Ceci signifierait donc que le lien manquant pour décrire précisément le développement des mathématiques chez l'enfant résiderait dans les doigts.

Dans le domaine du langage, l'importance de la gestuelle dans le développement les compétences langagières est admise (Cabrejo-Parra, 1992 ; Goldin Meadow & Butcher, 2003). En fonction du contexte d'utilisation, les gestes portent une signification propre ne nécessitant pas de précision orale : par exemple, en plongée, mettre en contact les pointes du pouce et de l'index tout en laissant les autres doigts tendus vers le haut signifie que tout va bien. De part leurs caractéristiques, certaines configurations de doigts utilisées en mathématiques peuvent être appelées emblèmes. En effet, elles sont porteuses de sens, compréhensives sans langage et partagées par un groupe d'individus (McNeill ; 1995). Pour Di Luca et Pesenti (2011), il ne s'agit cependant pas d'un simple code symbolique mais d'une véritable aide à la construction de la représentation du nombre. Cette notion ne fait toutefois pas consensus dans la littérature scientifique actuelle. En effet, des auteurs ont conclu que les doigts étaient utiles mais non nécessaires pour développer les compétences numériques symboliques précises (Lafay, Thevenot, Castel et Fayol, 2013).

Ainsi, il existe toujours des incertitudes sur la pertinence du support digital dans l'acquisition des mathématiques, ce qui justifie la conduite de ce mémoire. Le modèle du triple code (Dehaene, 1992), reflétant le traitement des quantités à l'âge adulte, sera présenté avant d'évoquer les apports des recherches scientifiques quant aux liens existant entre les doigts et les nombres.

Pour rendre compte de l'impact des doigts dans le traitement des quantités, un protocole a été créé à destination d'enfants scolarisés en classe préparatoire. Ce protocole comprend une évaluation des capacités arithmétiques et des gnosies digitales puis une épreuve informatisée de jugement d'égalité dont les résultats seront analysés en regard des scores aux tests précédents.

Contexte théorique, buts et hypothèses

1. Le modèle du triple code

Ce modèle a été proposé pour décrire le traitement des quantités et des nombres. Il a été construit en se basant sur des arguments neuro-anatomiques et neuropsychologiques qui ont permis de postuler l'existence de trois types de représentations : analogique, auditive verbale et visuelle arabe (Dehaene, 1992 ; Dehaene et Cohen, 2000). Chaque représentation est impliquée dans un traitement particulier du nombre mais communique constamment avec les autres. Ceci nous permet de passer spontanément d'un code à l'autre en fonction des activités, purement mathématiques ou non, qui nous apparaissent au quotidien.

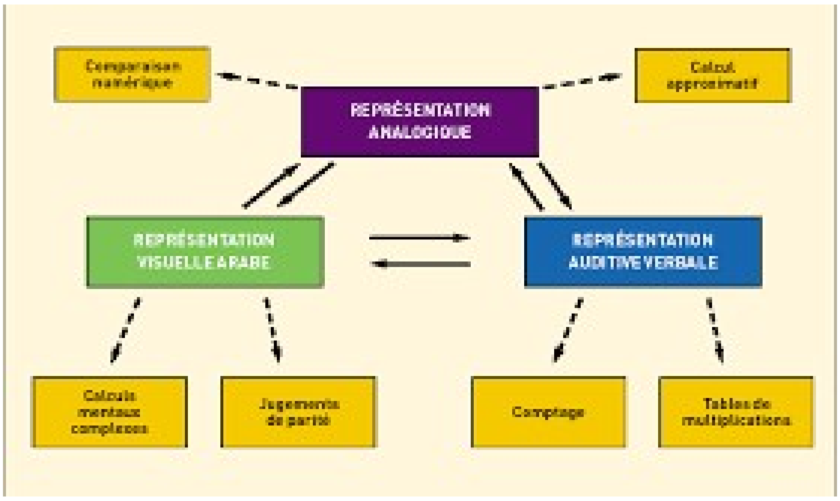

Figure 1 : Schéma du modèle du triple code de Dehaene et Cohen (Lemer, 2003)

1.1. Les différentes représentations de la numérosité

1.1.1. La représentation analogique (ou préverbale)

La représentation analogique correspond à la notion abstraite de quantité. De façon imagée, cette représentation peut s'illustrer par une ligne numérique mentale graduée, orientée de gauche à droite. A gauche se situent les petites magnitudes et à mesure que les quantités augmentent, les graduations associées se rapprochent : c'est ce qu'on appelle la compression logarithmique.

Cette ligne numérique mentale possède plusieurs propriétés concernant les relations entre les nombres. D'abord, il est plus facile de comparer deux quantités si la différence des deux est importante (par exemple 2 et 7 vs 6 et 7) : c'est l'effet de distance (Moyer et Landauer, 1967).

De plus, un second effet, appelé effet de taille, rend plus difficile la distinction d'ensembles composés d'un grand nombre d'éléments en comparaison des groupements d'éléments de quantité restreinte. Il est ainsi plus facile de faire la différence entre des paquets de 2 et 3 éléments que de distinguer un ensemble de 14 éléments avec un autre de 15 éléments.

Lorsque le rapport entre deux numérosités s'approche de 1, il devient plus difficile de discriminer celles-ci : c'est ce qu'on appelle l'effet de rapport. Celui-ci est fonction des deux effets précédents.

Le dernier effet est appelé effet SNARC, pour Spatial Numerical Association Response Code effect. Comme son nom l'indique, une association existerait entre représentation numérique et espace. Les nombres se trouveraient positionnés horizontalement dans l'espace du plus petit au plus grand correspondant au sens de l'écriture. Dans une tâche de comparaison, la réponse avec la main gauche intervient plus rapidement pour indiquer un chiffre plus petit que la cible et inversement pour la main droite. Cet effet est présent chez les droitiers comme chez les gauchers (Dehaene, Bossini et Giraux,1993).

Cette représentation permet d'aborder la numérosité par l'estimation, l'appréhension immédiate de petites quantités entre 1 et 4 aussi appelée subitizing, les comparaisons de petites quantités et les calculs approximatifs. La connaissance de symboles n'est pas nécessaire puisqu'on accède directement à la quantité. En effet, Cantlon et Brannon (2006) ont conduit une expérimentation auprès de singes et d'adultes humains qui, après entraînement, devaient réaliser des additions d'ensembles de points. Cette expérience a montré que les singes étaient capables, tout comme les humains, d'additionner des valeurs numériques familières et non familières et que, de ce fait, ils possédaient bien une représentation abstraite des quantités.

Par ailleurs, il existe des données en faveur de l'existence des effets présentés précédemment chez les animaux. Une étude menée chez des rats, entraînés à presser une pédale 4, 8, 12 ou 16 fois pour obtenir une récompense, indique une détérioration des performances à mesure que la numérosité de la cible augmente. Ceci correspond à un effet de taille (Mechner, 1958). Un effet de rapport a également été observé chez des vairons, servant à la survie des poissons (Barber et Wright, 2001).

Cette représentation apparaît très tôt dans le développement de l'enfant. Des études montrent en effet que les nouveau-nés sont capables de traiter les quantités dès les premiers jours de vie. Dès 1980, Starkey et Cooper ont ainsi mis en évidence une discrimination des petites quantités chez des bébés de quelques mois grâce à un paradigme d'habituation. Des résultats semblables ont également été observés chez des nouveau-nés de quelques jours (Antell et Keating, 1983). Cependant, la précision de la discrimination chute quand les magnitudes augmentent.

1.1.2. La représentation visuelle arabe

Il s'agit de la forme visuelle des nombres transcrits en chiffres arabes. Elle repose sur l'utilisation de la base 10. Cette représentation est manipulable mentalement, ce qui permet le traitement des nombres arabes et les calculs écrits. Contrairement à la représentation auditive verbale présentée plus tard, celle-ci ne dépend pas du langage puisqu'elle est utilisée dans des langues différentes.

En revanche, il est nécessaire de connaître les règles d'agencement de ce lexique limité, composé des chiffres de 0 à 9. En effet, un même chiffre représente une valeur différente en fonction de sa position au sein d'un nombre : c'est un système positionnel. L'utilisation du 0 est celle qui apparaît comme étant la plus complexe puisqu'il possède un double statut, à la fois lexical et syntaxique (Lochy et Censabella, 2005).

1.1.3. La représentation auditive verbale

Il s'agit de la représentation phonologique du nombre, ce qui signifie que chaque quantité possède une étiquette verbale qui lui est associée. Cette étiquette n'est pas seulement orale, elle renvoie aussi à la forme écrite en lettres du nombre. Cette représentation est impliquée dans le traitement des noms de nombres, des faits arithmétiques (opérations apprises et récupérées en mémoire) et permet le comptage. Cette représentation est liée au langage et utilise donc les mêmes processus de traitement. En effet, pour Dehaene et Cohen (2000), dans cette modalité, « les nombres sont représentés comme des séquences de mots syntaxiquement organisés ».

Ces séquences, qui constituent la chaîne numérique verbale, se composent donc d'un lexique, d'une syntaxe mais aussi de bases (Fayol et al., 2006). Le lexique correspond à un stock limité d'éléments dont le nombre varie d'une langue à l'autre. Ces éléments peuvent être combinés à l'infini pour créer des nombres, soit selon une règle additive (par exemple le nombre vingt-six, traduit le calcul 20+6) soit selon une règle multiplicative (par exemple, le nombre quatre-vingt renvoie à l'opération 4x20). Enfin, la base la plus connue en français est la base 10 mais on retrouve aussi la base 60 impliquée notamment dans le traitement des horaires. Il est donc nécessaire de maîtriser le code utilisé par ses pairs pour utiliser ce système.

Cette représentation n'est en revanche pas présente universellement. En effet, Gordon (2004) a mené des recherches auprès des Pirahãs, tribu amazonienne, dont le lexique oral mathématique est peu étendu. Celui-ci se compose des termes correspondant à « un », « deux » et « plusieurs ». Suite à ces recherches, il apparaît que les capacités en dénombrement de cette tribu sont limitées en raison de la pauvreté du lexique oral mathématique. Une étude réalisée auprès d'une autre tribu amazonienne, les Mundurucus, dont le lexique de noms de nombre est également restreint, indique que les participants sont en difficulté pour réaliser des opérations arithmétiques exactes (Pica et al, 2004).

1.2. La relation entre les représentations analogiques et arabes

Les différentes représentations sont à la fois indépendantes et en constance interaction. D'un point de vue fonctionnel, les procédures de transcodage permettent une traduction directe d’un code à un autre (Dehaene, 2001). Seule la relation entre les représentations analogiques et arabes sera décrite dans cette partie, celle-ci étant au cœur de la partie expérimentale de ce mémoire.

Au cours d'expérimentations menées auprès d'adultes, Dehaene (2010) a pu mettre en évidence un lien entre espace et nombre traduisant un effet de distance lors d'une tâche de comparaison de chiffres sous formes arabes (2 et 9 vs 5 et 6). Cet effet de distance correspond au temps de réaction nécessaire pour comparer deux quantités : plus les nombres sont distants, plus le traitement est rapide et sans erreurs. Les observations de Dehaene amènent à la conclusion que le traitement des représentations arabes est indissociable de la quantité codée sous une forme spatiale et linéaire. Or, comme évoqué précédement, cette représentation est soumise à une compression logarithmique. Ainsi, les nombres arabes les plus petits seront comparés plus aisément que les plus grands. De plus, Dehaene et Akhavein (1995) ont démontré, grâce à une tâche de Stroop au cours de laquelle les participants devaient désigner la plus grande quantité, que les magnitudes étaient automatiquement activées lors de la présentation de chiffres arabes.

1.3. Au niveau anatomo-fonctionnel

L'élaboration du modèle triple code ne repose pas uniquement sur la description de systèmes interconnectés intervenant dans la cognition mathématique. L'exploration par imagerie cérébrale a permis d'identifier trois réseaux neuronaux principaux, chacun impliqué dans le traitement numérique pour des tâches spécifiques. Ainsi, le traitement des quantités active le gyrus intrapariétal, le cortex pariétal supérieur intervient lors de tâches exigeant des capacités visuo-spatiales et le gyrus angulaire gauche permet la réalisation de calculs. On remarque que ces aires interviennent dans le traitement langagier oral et/ou écrit (Houdé, Mazoyer et Tzourio-Mazoyet, 2002). Une atteinte du gyrus angulaire gauche peut notamment engendrer un syndrome de Gerstman, caractérisé par, entre autres, par une dysgraphie, une acalculie et une agnosie digitale (non reconnaissance de ses propres doigts) (Benton et al, 1992).

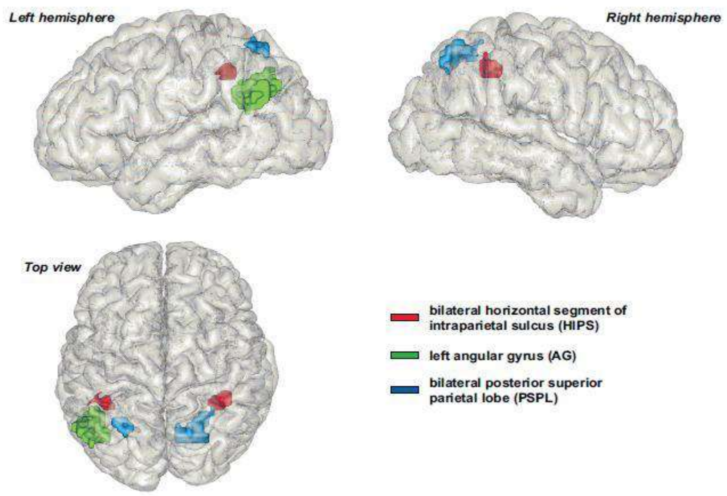

Figure 2 : Principaux réseaux neuronaux impliqués dans le traitement numérique (issus de Dehaene, Piazza, Pinel, Cohen ; 2003)

Pourtant, alors que le gyrus angulaire est impliqué à la fois dans la réalisation de calcul et la reconnaissance des doigts, le modèle décrit par Dehaene ne rend pas compte de ce dernier aspect.

2. Liens entre doigts et nombres

2.1. Gestes comme codage des quantités

Certaines configurations de doigts représentant les quantités correspondent aux gestes conventionnels : ils sont compréhensibles sans parole, renvoient directement à la magnitude signifiée et leur organisation correspond à une norme partagée par un groupe d'individus (McNeil, 1985). En effet, les configurations digitales utilisées pour symboliser les quantités ne sont pas les mêmes en Chine et en France par exemple.

Ainsi, il existe des configurations de doigts dites canoniques, correspondantes au codage habituel des individus et des configurations non canoniques qui représentent les magnitudes de façon non conventionnelle. Cette distinction est importante pour le traitement des quantités : les jeunes adultes parviennent à identifier plus rapidement les magnitudes lorsque les doigts mobilisés sont configurés de façon canonique en comparaison aux configurations non canoniques (Andres, Di Luca et Pesenti, 2008). Les configurations canoniques digitales ont donc bien un statut sémantique (Di Luca, Pesenti, 2008). Cette conclusion peut être le résultat de l'activation des neurones miroirs : à l'affichage des configurations digitales, les neurones moteurs impliqués s'activeraient chez les participants permettant un meilleur traitement (Rizzolatti et all, 1996). Une étude a aussi mis en évidence une implication inconsciente des doigts dans des activités numériques (Sato et all, (2007). Les auteurs montrent que la simple présentation de chiffres active automatiquement les réseaux neuronaux impliqués dans les représentations digitales et situés dans le gyrus précentral gauche.

En plus d'être mieux identifiées, lors d'une tâche de comparaison de magnitudes, les configurations canoniques, utilisées comme amorces, sont plus efficaces en termes d'exactitude et de vitesse de réponse (Di Luca, Pesenti, 2008). Par la suite, Di Luca, Lefèvre et Pesenti (2010) ont tenté d'apporter une explication à cette différence d'éfficacité grâce à un paradigme d'amorçage comparant les deux types de configurations. Les participants devaient dénommer des chiffres arabes après une amorce présentant une magnitude différente sous forme de confirgurations de doigts, canoniques ou non canoniques. Les résultats obtenus mettent en évidence un effet de distance important pour les configurations canoniques. Ceci suggère fortement que les configurations canoniques se positionnent sur une ligne mentale, tout comme les chiffres arabes, ce qui permet un accès au sens : ce traitement est appelé « place-coding », en opposition au « summation coding » (Roggeman et al ; 2007).

Pour Di Luca et ses collègues, les observations faites au travers des différentes études justifieraient une inclusion des doigts dans le modèle de Dehaene. Cependant, ils précisent que les configurations digitales ne constituent pas un code symbolique parmi d'autres mais aideraient également à construire la représentation du nombre (Di Luca et Pesenti, 2011).

2.2. Différentes hypothèses expliquant le lien doigt-nombre

2.2.1. Hypothèse locationnaliste

Cette hypothèse s'appuie sur la proximité des zones cérébrales activées lors de l'utilisation des nombres et des gnosies digitales. Ce sont les travaux de Gerstman (1940), portant sur le syndrome de même nom, qui ont conduit à cette hypothèse. Le syndrome de

Gerstman se manifeste par quatre symptômes principaux : désorientation droite-gauche, agraphie, acalculie et agnosie digitale. Tous ces troubles seraient la conséquence d'une atteinte dans la région supérieure et postérieure du lobe pariétal. Les compétences en arithmétique et en gnosies digitales seraient donc dépendantes des mêmes aires cérébrales puisqu'une unique lésion engendrerait des difficultés dans les deux compétences. En effet, il existe de nombreux cas relatant une acalculie associée à une agnosie digitale, même d'un point de vue développemental : les enfants nés avec une agnosie digitale présenteraient également des difficultés dans le développement de l'arithmétique (Kinsbourne et Warrington, 1963). De plus, une étude longitudinale menée chez des enfants tout-venant a mis en évidence une corrélation entre les capacités arithmétiques et les gnosies digitales (Noël, 2005). Selon Noël, ces dernières pourraient même prédire le développement des compétences mathématiques futures.

2.2.2. Hypothèse de recyclage neuronal

Cette hypothèse, soutenue par Dehaene et Cohen (2007), défend l'idée que les circuits neuronaux autrefois utilisés pour des tâches telles que la numération, basée sur un apprentissage culturel, sont réinvestis par d'autres compétences. Les fonctions initialement mobilisées seraient ainsi délaissées au profit des nouvelles. Ainsi au cours du développement, le circuit neuronal supportant à l'origine la représentation des doigts sert ensuite la représentation du nombre.

2.2.3. Hypothèse fonctionnelle

En plus de leur visée symbolique, les configurations digitales permettraient également la construction de la représentation du nombre. La sémantique des nombres seraient renforcées au travers d'expériences sensori-motrices (Di Luca et Pesenti, 2011). En effet, à chaque configuration est associée une magnitude. Grâce aux présentations répétées doigts-nombre, le lien fonctionnel s'établirait au cours du développement.

Dans une étude, des chercheurs ont cherché un impact des gestes dans l'apprentissage de concepts mathématiques chez l'enfant (Cook, Mitchell, Goldin-Meadow, 2008). Les participants ont été répartis en deux groupes. Dans l'un deux, les enfants étaient autorisés à utiliser les mouvements de mains pendant l'explication de la notion nouvelle. Dans le second groupe, les sujets n'avaient pas le droit d'utiliser le geste. Suite à l'enseignement, une évaluation des connaissances était proposée en différée. Les résultats montrent que les enfants autorisés à se servir de gestes lors de l'apprentissage parvenaient mieux à se rappeler de la notion, contrairement au groupe sans support gestuel.

D'autres auteurs ont également mis en évidence un lien fonctionnel entre doigts et habiletés numériques. Gracia et ses collègues (2008) ont comparé les performances numériques de jeunes enfants après entraînement ou non des gnosies digitales. Cette étude révèle que cet entraînement a permis l'amélioration de l'ensemble des compétences numériques. Ces résultats ont cependant été discrédités au point de vue statistique par la suite (Fischer, 2010).

Enfin, les doigts peuvent être mobilisés au travers de plusieurs tâches numériques. En plus d'être impliqués dans la représentation de la cardinalité, ils permettent également le dénombrement, le soulagement de la mémoire de travail et bien sûr, le pointage (Noël, 2005). Le caractère prédictif de ce dernier geste est d'ailleurs reconnu en ce qui concerne le développement du langage (Cabrejo-Parra,1992). Cependant, certains enfants, avec très peu d'expériences de manipulation digitale en raison de difficultés motrices développementales ont pourtant des gnosies digitales préservées, tout comme leurs habiletés numériques (Penner-Wilger et Anderson, 2013).

2.3. Les doigts dans le développement numérique

2.3.1. Des gnosies digitales anticipatrices

Une étude a montré que les capacités arithmétiques entre 5 et 7 ans étaient prédites par le niveau en gnosies digitales à un âge antérieur mais qu'il existe également une corrélation entre ces mêmes gnosies et les autres tâches qui mobilisent la représentation des magnitudes (Noël, 2005). Fayol, Barouillet et Marinthe (1998) ont réalisé un suivi longitudinal d'enfants tout-venant entre 5 et 6 ans pour tenter de mettre en lien le niveau de développement intellectuel avec le niveau arithmétique. Parmi les tests proposés aux enfants, se trouvaient celui évaluant les gnosies digitales et une évaluation des compétences arithmétiques. Les deux tâches ont été administrées avec huit mois d'intervalle et les résultats ont permis d'affirmer l'existence d'une corrélation entre ces compétences. Les chercheurs ont ainsi montré que les compétences en gnosies digitales à 5 ans constituaient un meilleur prédicteur des performances arithmétiques entre 5 et 6 ans que le niveau intellectuel.

2.3.2. Mise en place du système de comptage

Au cours de l'apprentissage des compétences mathématiques, les doigts sont investis de façon excessive par certains enfants : le support digital est alors utilisé lors de tâche de calcul alors même que l'enfant doit résoudre des opérations dont il connaît le résultat (Domahs, Krinzinger et Willmes, 2008). En effet, ceux-ci respectent le fonctionnement de la base 10, illustrent les principes d'ordre stable et de cardinalité, montrent la correspondance terme à terme et gardent une trace visible des nombres de la comptine numérique. Ainsi, il est admis que les doigts ont un rôle fonctionnel dans la mise en place d'un système de comptage efficace et mature (Crollen, Seron et Noël, 2011).

Cependant, ces auteurs nuancent leur propos en précisant que les doigts sont utiles mais pas nécessaires pour développer la représentation du nombre. En effet, chez les enfants au développement typique, l'utilisation des noms de nombres précède celle du support digital. Ensuite, si le mécanisme de la comptine numérique n'est pas maîtrisé, les doigts ne permettent de développer que la représentation de petits nombres. De plus, dans certaines cultures, il n'existe pas de modèle enseigné pour compter sur les doigts : il est rare par exemple que des enfants aveugles se servent de leurs doigts comme support au comptage. Enfin, certains enfants tout-venants se passent de l'utilisation de leurs doigts pour les tâches de comptage sans qu'il y ait de conséquences sur le développement de leurs compétences mathématiques.

2.3.3. Support à la mémoire de travail

Une étude a montré qu'une mémoire de travail efficiente était un facteur favorisant le développement des compétences numériques (De Smedt et al., 2009). Ces auteurs ont comparé l'efficacité de la boucle phonologie et du calepin visuo-spatial comme prédicteur des compétences numériques. Il s'avère qu'en classe préparatoire, le calepin visuel prédit mieux que la boucle phonologique les futures performances arithmétiques. En revanche, dès le cours élémentaire 1, la boucle phonologique obtient un poids prédictif supérieur. Ce basculement signifie qu'au début des apprentissages, les enfants préfèrent utiliser des supports visuels concrets et qu'une fois familiarisés avec les différentes représentations, ils s'appuient sur la forme auditive des nombres.

Cependant, puisque le support digital est disponible et consultable visuellement en permanence, les doigts permettent d'alléger la mémoire de travail pendant les tâches de comptage (Gary & Wiley, 1991). Les informations trop nombreuses ou complexes qui ne peuvent être stockées en mémoire peuvent être affichées, modifiées et réutilisées sur les doigts, qui sont des quantités discrètes manipulables.

3. Buts et hypothèses

L'objectif de ce mémoire est d'étudier l'impact des configurations canoniques digitales dans le traitement des petites numérosités chez des enfants de 6 à 7 ans.

En effet, les recherches scientifiques issues du domaine de la cognition mathématique semblant montrer une corrélation entre compétences arithmétiques et gnosies digitales sont très peu nombreuses : il s'agit des travaux de Fayol et ses collègues en 1998 puis ceux menés par Noël en 2005. De plus, ces résultats sont nuancés par d'autres auteurs qui, par leurs travaux, montrent que la corrélation observée n'est pas systématique (Fischer, 2010).

Ce travail vise donc à compléter les connaissances actuelles sur l'importance des doigts dans la maîtrise de l'arithmétique. Ainsi nous espérons pourvoir notre position par rapport à la question fréquemment posée : Est-il pertinent d'enseigner les mathématiques en utilisant le support digital ?

Pour tenter de répondre à cette problématique, nous avons élaboré une tâche expérimentale informatisée qui vise à évaluer l'efficacité des représentations digitales dans le traitement des quantités en comparaison au traitement de chiffres arabes et de points. Pour compléter notre protocole expérimental, une évaluation des habiletés arithmétiques et un test des gnosies digitales sont également prévus.

Cette étude s'inscrit dans un projet plus large et complètera les données obtenues auprès de jeunes adultes sur ce même sujet. Au regard de la littérature évoquée précédemment, nous nous attendons à ce que :

1/ Le temps de traitement de la représentation analogique et des configurations canoniques de doigts soit équivalent.

2/ L'amorce sous forme de chiffres arabes soit la plus efficace.

3/ Les performances au test arithmétique et au test de gnosies digitales soient corrélées à la capacité d'identifier une égalité numérique sous deux formats différents présentés successivement.

Méthode

1. Les participants

Au total, 42 enfants dont la moyenne d'âge est de 6 ans 8 mois (ET = 3,142, minimum : 5 ans 11 mois et maximum : 7 ans 3 mois) ont été recrutés au sein de l'école primaire Saint Charles de Saint-Martin-Boulogne, dans la région des Hauts-de-France. Ils sont issus de deux classes de niveau classe préparatoire.

1.1. Critères d'inclusion

Les enfants devaient être scolarisés en classe préparatoire et avoir une bonne vision.

1.2. Critères d'exclusion

Les participants ne devaient pas présenter de troubles visuels non corrigés, de troubles neurologiques ni de troubles d'apprentissages soupçonnés ou avérés.

2. Matériel

Le protocole de test comprend trois sous-parties : une tâche expérimentale informatisée, un test d'habilités numériques et un test de gnosies digitales. On compte environ 45 minutes de passation pour l'ensemble du protocole.

En amont, deux lettres d'information (cf Annexe 1 et 3) avaient été rédigées, pour présenter l'étude aux parents et aux enfants, accompagnées de deux formulaires de consentement (cf Annexe 2 et 3). Les enseignantes se sont chargées de distribuer ces documents que nous avons ensuite récupérés avant de débuter toute passation. Enfin, pour préserver l'anonymat des participants, un numéro généré aléatoirement a été attribué à chacun, puis utilisé lors de la manipulation informatique.

Le protocole a été administré en dehors de la classe, dans une salle libre de toute activité, calme et bien éclairée. Chaque exercice s'est déroulé en condition duelle participant-examinateur. Le test de gnosies digitales et le test d'habilités arithmétiques ont été administrés au cours d'une session de quinze minutes. Le test informatique, comprenant deux sessions de dix minutes, est proposé avec un intervalle d'environ une semaine entre les deux blocs. Ceci permet de pallier les difficultés attentionnelles de l'enfant, tout en évitant un biais lié aux apprentissages et à la maturation cérébrale. Entre les deux blocs, les performances réalisées par un même enfant sont donc homogènes.

2.1. Le test d'habilités arithmétiques

Pour évaluer les compétences arithmétiques des enfants, le Tempo Test Rekenen a été utilisé (De Vos, 1992). Ce test vise à évaluer l'automatisation des opérations arithmétiques chez les enfants du CP à la 5e. Pour le TTR

Pour se faire, l'enfant doit résoudre des calculs écrits horizontalement. Chaque opération arithmétique (addition, soustraction, multiplication et division) est d'abord évaluée de façon isolée. L'exercice se conclut par une série de calculs mélangeant toutes les procédures. Les calculs sont répartis en colonnes, chacune correspondant à une procédure. L'enfant dispose ensuite d'une minute par colonne pour inscrire le plus de résultats possibles en regard des calculs proposés. Les calculs sont organisés du plus simple au plus complexe. Ainsi, si pour les premières opérations de chaque colonne, la récupération de faits arithmétiques en mémoire est possible, le recours aux procédures de calcul devient très vite nécessaire pour les calculs suivants. La consigne donnée pour chaque colonne est « Réalise le plus d'additions / soustractions / multiplications / divisions / opérations mélangées possible en une minute ». De ce fait, l'enfant peut tout à fait passer des énoncés mais l'expérimentateur ne doit pas lui en faire mention. Une fois l'épreuve terminée, on additionne les sous-score pour chaque colonne afin d'obtenir le score total.

Le test d'origine préconise d'évaluer les quatre opérations mais, compte-tenu du niveau scolaire des participants, seules les additions et les soustractions ont été proposées. En effet, multiplications et divisions n'ont pas été abordées à ce stade de leur formation. Le score total obtenu a ensuite été comparé aux normes établies lors de l'étalonnage pour la Flandre comprenant 10059 enfants flamants (Ghesquière & Ruijssenaars, 1994).

2.2. Evaluation des gnosies digitales.

Le test choisi est celui créé par Galifret-Granjon (1964) et utilisé auprès d'enfants de 6 à 14 ans.

Le participant et l'examinateur sont installés face à face à d'une table. Avant de débuter l'épreuve et pour avoir des informations sur la latéralisation des enfants, il leur a été demandé de préciser oralement la main dominante puis de la poser sur la table.

Le test commence par une présentation d'un dessin de main homologue à celle posée sur la table. L'enfant peut vérifier, s'il le souhaite, que ces deux mains sont similaires. Sur le schéma, on attribue un chiffre de 1 à 5 à chaque doigt en partant du pouce. La consigne donnée est de nommer, par les numéros correspondants, les doigts touchés par l'examinateur en s'aidant du dessin et des sensations tactiles. Pour cela, chaque participant glisse sa main dans une boîte dont l'orifice, de taille réduite, ne permet pas d'avoir visuellement accès à ses doigts. Du point de vue de l'examinateur, cette boîte doit posséder une ouverture suffisamment large pour permettre une observation efficace.

Trois types de stimulations sont proposés : un doigt pressé seul, plusieurs doigts touchés successivement et deux appuis simultanés. Chaque modalité requiert dix stimulations par main, ce qui permet d'obtenir six scores. Nous n'avons fait passer que la première modalité sur les deux mains. En effet, nos participants ne présentant pas de pathologie avérée, leurs performances sur l'ensemble du test seraient conformes à ce qui est attendu pour leur âge. De la même façon, si les erreurs sont trop nombreuses dès la première phase, on s'attend à des scores déficitaires sur l'ensemble du test, ce qui motiverait une exclusion du participant en question.

2.3. La tâche expérimentale informatisée

Cette dernière étape constitue le cœur du protocole expérimental. Il s'agit d'une épreuve de jugement d'égalité : les participants doivent indiquer, en appuyant sur la touche dédiée, si deux formats successifs renvoient à la même magnitude.

L'expérimentation a été conduite sur un ordinateur HP ProBook, 15 pouces, de résolution 1920x1080 et équipé du logiciel contenant la manipulation. La touche désignée comme moyen de réponse est la barre espace de l'ordinateur.

L'expérience consiste en une tâche d'amorçage et se déroule selon la séquence suivante (figure3) : (1) un écran brouillé apparaît pendant 400 ms, servant de masque ; (2) présentation d'un stimulus pendant 600 ms ; (3) un écran masque apparaît pendant 400 ms ; (4) présentation d'un autre stimulus pendant 600 ms. Les participants doivent indiquer quand deux quantités successives sont équivalentes. Si les numérosités représentées ne sont pas égales, les enfants ne doivent pas répondre mais attendre l'écran suivant. Il a été explicitement demandé à l'enfant de répondre le plus rapidement possible en commettant un minimum d'erreurs.

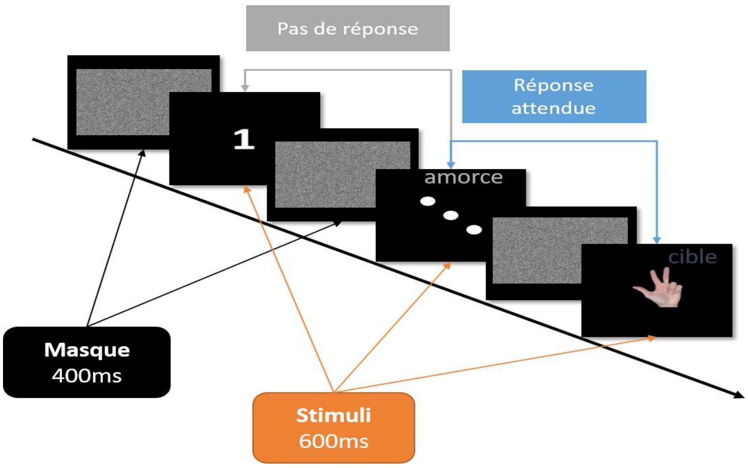

Figure 3 : illustration du protocole proposé

Les stimuli proposés sont de trois types : chiffre arabe, pattern de points correspondant aux faces du dé et configuration canonique de doigts. Les numérosités étudiées sont comprises entre 1 et 5 inclus. Afin de familiariser l'enfant avec les différentes représentations et la vitesse d'enchaînement de présentation, une première phase d'entraînement est proposée, permettant dans le même temps de vérifier que la consigne a bien été comprise. Une fois ce bloc réussi, c'est-à-dire que l'enfant a identifié les égalités, la phase d'expérimentation commence. Celle-ci est composée de quatre blocs de cinq minutes chacun. Entre chaque bloc, des pauses sont proposées au participant qui est ensuite libre de reprendre quand il le souhaite. De plus, au sein de chaque bloc, d'autres pauses sont proposées toutes les minutes.

Cette manipulation a été administrée en deux fois dix minutes aux enfants. Lors de la première session, la consigne a été expliquée et la phase d'entraînement et les deux premiers blocs ont été proposés. Puis, pour la deuxième session, une nouvelle phase d'entraînement a été prévue avec un rappel de la consigne, suivie des blocs 3 et 4.

3. Data-analyses

Les résultats obtenus sur l'ensemble du protocole ont été analysés grâce au logiciel d'analyses statistiques JASP (JASP Team, 2018).

Afin de vérifier l'existence d'un lien entre les performances arithmétiques et les gnosies digitales, nous avons choisi de réaliser une analyse de corrélation de Pearson. Cette analyse est ensuite reconduite pour chercher une corrélation entre les résultats obtenus au test des gnosies et ceux issus de la tâche expérimentale informatisée.

Pour chaque enfant, nous avons obtenu avec précision le temps de réponse (délai entre l'affichage des stimili et la pression de la touche) et le taux de bonnes réponses pour chaque format de présentation. Dans un tableur recensant toutes les stimuli et cibles, nous avons ajouté deux filtres : l'un met en évidence les associations pour lesquelles l'enfant a répondu, de manière exacte ou erronée, et l'autre met en lumière les paires qui devaient être identifiées. Un pourcentage a ensuite été calculé sur le nombre total de réponse attendue.

Pour déterminer l'analyse statistique la plus appropriée, la vérification du caractère normal de la distribution des données a été réalisée par le biais du test de Levene et l'analyse visuelle de la distribution des résidus du modèle par rapport à la droite de Henry sur un graphique quantile-quantile.

Nous avons ensuite réalisé une analyse de type ANOVA afin de mettre en évidence un éventuel effet nos différentes variables, à savoir cinq numérosités (1, 2, 3, 4, 5), trois types d'amorce (doigts, chiffres, points) et trois types de cible (doigts, chiffres, points).

Résultats

Cette partie présente les performances aux différentes épreuves afin de les confronter à nos hypothèses dans un second temps.

1. Analyses préliminaires

1.1. Résultats test arithmétique versus gnosies digitales

Avant de comparer ces deux résultats entre eux, nous nous sommes assuré qu'aucun score n'était déficitaire.

1.1.1. Test arithmétique

La moyenne des résultats obtenus pour l'ensemble de enfants à la sous épreuve d'additions est de 8.36 (E.T. = 2.74), et à la sous épreuve de soustractions est de 5.90 (ET = 3.01), la moyenne totale est de 14.26 (ET = 5.12). D'un point de vue qualitatif, ce test nous a permis d'observer que certains enfants se basaient sur leurs doigts pour résoudre les opérations même les plus simples, tandis que d'autres ne les ont pas utilisés ou seulement dans le cadre de la résolution de soustractions.

1.1.2. Gnosies digitales

Bien que ce test n'ait pas été proposé en entier, la modalité de stimulation unique ne met en difficulté sévère aucun enfant. La moyenne des résultats obtenus pour l'ensemble de enfants sur la main droite est de 8.60 (E.T. = 1.31), et à sur la main gauche est de 8.71 (ET = 1.24), la moyenne totale est de 17.31 (ET = 2.18). On note cependant de fréquentes confusions entre le majeur et l'annulaire de chaque main, quelle que soit la main dominante de l'enfant.

1.1.3. Mise en corrélation

Nous voulions nous assurer de la corrélation entre les performances en arithmétique et en gnosies digitales. Le coefficient *r* obtenu permet d'observer une corrélation positive entre le score global au test arithmétique et les gnosies mesurées par le test Galifret-Granjon, mais il s'agit d'un effet de petite taille ($r = 0.15$; $p = < 0.001$). Cette corrélation faible entre performances arithmétiques et gnosies digitales est donc à interpréter avec prudence.

1.2. Test gnosies digitales versus tâche expérimentale informatisée

Nous avons émis l'hypothèse selon laquelle les performances aux gnosies digitales seraient corrélées à la capacité d'identifier l'égalité entre deux magnitudes, indépendamment du format de présentation. Pour cela, nous avons utilisé le taux de bonnes réponses (c'est-à-dire les nombres d'appuis corrects indiquant une égalité entre deux stimuli successifs de format différent) relevé chez les enfants à la tâche expérimentale informatisée. L'analyse de corrélation de Pearson met en évidence une corrélation positive moyenne entre ces deux variables ($r = 0.26$; $p = < 0.001$). La capacité à identifier une magnitude représentée sous deux formats différents semble donc liée à la reconnaissance de ses doigts.

1.3. Test arithmétique versus tâche expérimentale informatisée

Dans l'optique de vérifier notre hypothèse de corrélation entre compétences arithmétiques et capacité d'identification d'égalité entre deux magnitudes présentées successivement sous deux formats différents, nous avons repris le score global obtenu au TTR et le taux de bonnes réponses à la tâche expérimentale informatisée. Là encore, une corrélation positive moyenne est mise en évidence par l'analyse de corrélation de Pearson ($r = 0.26$; $p = < 0.001$). Les compétences arithmétiques et la capacité à identifier une égalité de magnitude entre deux représentations différentes semblent donc liées.

2. Analyse de la tâche expérimentale informatisée

2.1. Analyse générale

Après avoir appliqué nos filtres de tri sur nos données, nous avons calculé le pourcentage de bonnes réponses obtenues. Sur l'ensemble de la tâche expérimentale informatisée, seules 17% de bonnes réponses (c'est-à-dire d'identification correcte d'égalité entre deux stimuli successifs) ont été obtenues. Les analyses suivantes, découlant de ce faible pourcentage, sont donc à interpréter avec prudence.

Après avoir effectué le test de Levene, il s'avère que les données suivent une distribution normale ($F(29,1636) = 1,105$; $p = 0,319$). . Ceci est par ailleurs confirmé par le graphique quantile-quantile, montrant que les résidus obtenus suivent la droite de Henry (figure 4).

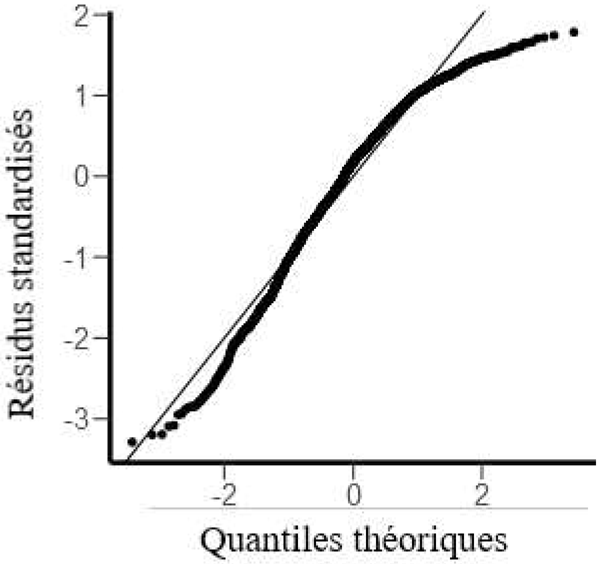

Figure 4 : distribution des résidus du modèle par rapport à la droite de Henry

Compte-tenu de ces résultats, nous pouvons donc effectuer une analyse de la variance de type ANOVA.

2.2. Effet de l'amorce

Nous nous sommes tout d'abord intéressés à l'impact du format de l'amorce (doigts, points, chiffres arabes) sur le temps de réponse des sujets (c'est-à-dire le temps mis par les sujets pour confirmer à bon escient que deux numérosités présentées successivement sont identiques).

L'ANOVA à mesures répétées pour les amorces doigts (M = 491.62 ; ET = 32.87), points (M = 486.4 ; ET = 32.2) et chiffres arabes (M = 494.38 ; ET = 36.27) n'a pas permis de mettre en évidence une différence entre les trois amorces (F (2, 64) = 1.022 ; p = .366 ; figure 5).

Par ailleurs, la comparaison une à une des amorces pour échantillon appariés (test-t ; e.g., doigts versus NA, doigts versus points...) n'a pas permis de différence entre les amorces (ps ≥ .356).

Ainsi, le format de l'amorce n'a pas d'effet, positif ou négatif, sur le temps de réponse.

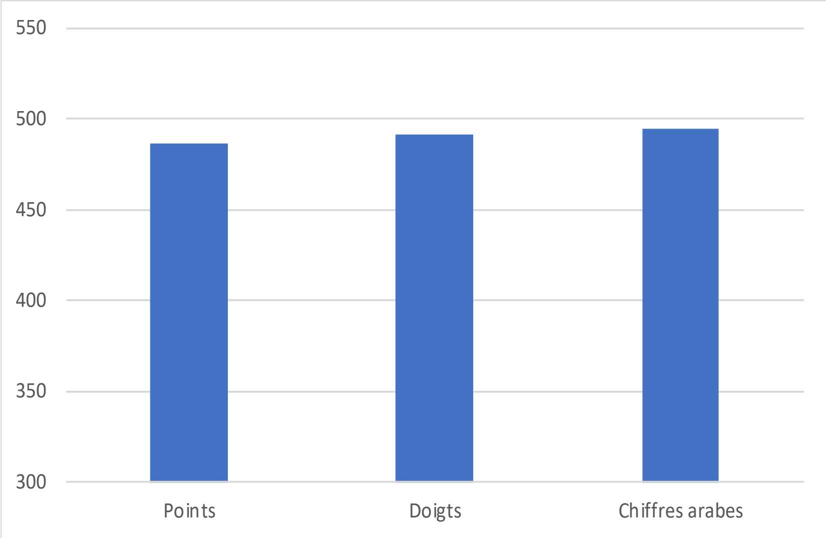

Figure 5 : temps de réponse en fonction du format de l'amorce

2.3. Effet de la cible

Nous nous sommes intéressés à l'impact du format de la cible (doigts, points, chiffres arabes) sur le temps de réponse des sujets (c'est-à-dire le temps mis par les sujets pour confirmer à bon escient que deux numérosités présentées successivement sont identiques).

Les résultats mettent en évidence des temps identiques pour les trois cibles, les enfants ne répondent pas plus vite qu'il s'agisse de doigts (M = 496.28 ; ET = 35.32), de points (M = 494.01 ; ET = 44.36) ou de chiffres arabes (M = 482.11 ; ET = 30.48 ; F (2, 64) = 2.16 ; p = .124 ; figure 6).

Enfin, la comparaison une à une des amorces pour échantillon appariés (test-t ; e.g., doigts versus chiffres arabes, doigts versus points, etc.) a permis de mettre en évidence une différence marginale entre les cibles chiffres arabes et doigts ($t(32) = 1.949$; $p = .06$) ; toutes les autres comparaisons sont non significatives ($ps \geq .148$).

Le format de la cible n'a donc pas d'effet significatif sur le temps de réponse.

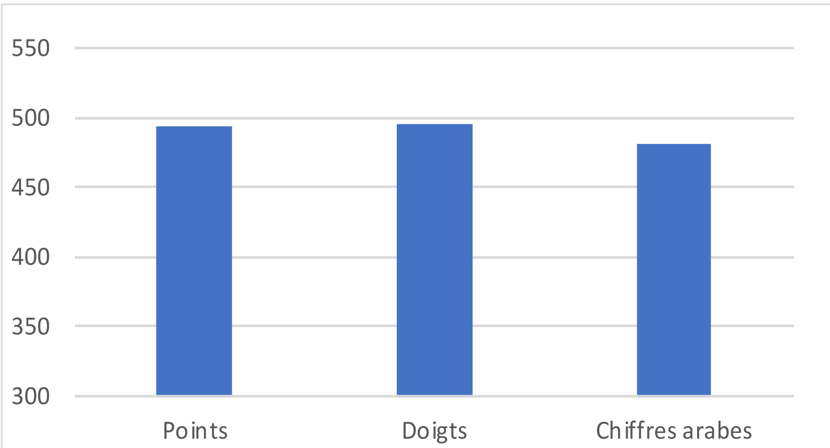

Figure 6 : temps de réponse en fonction du format de la cible

Nous nous sommes ensuite intéressés à l'impact du format de la cible (doigts, points, chiffres arabes) sur le nombre de bonnes réponses des sujets (c'est-à-dire le nombre d'appuis à bon escient lorsque deux numérosités présentées successivement sont identiques).

Les résultats mettent en évidence un nombre d'appui différents pour les trois cibles, les enfants répondent avec un taux de bonne réponse plus important lorsqu'il s'agit de chiffres arabes (M = 17.80 ; ET = 12.06), puis de points (M = 13.28 ; ET = 10.46) et enfin de doigts (M = 10.72 ; ET = 9.68 ; F (2, 78) = 32.14 ; $p \leq .001$; figure 7).

Enfin, la comparaison une à une des amorces pour échantillon appariés (test-t ; e.g., doigts versus chiffres arabes, doigts versus points, etc.) a permis de mettre en évidence une différence significative entre toutes les cibles ps $\leq .004$).

Le taux de bonnes réponses est significativement impacté par le format de la cible.

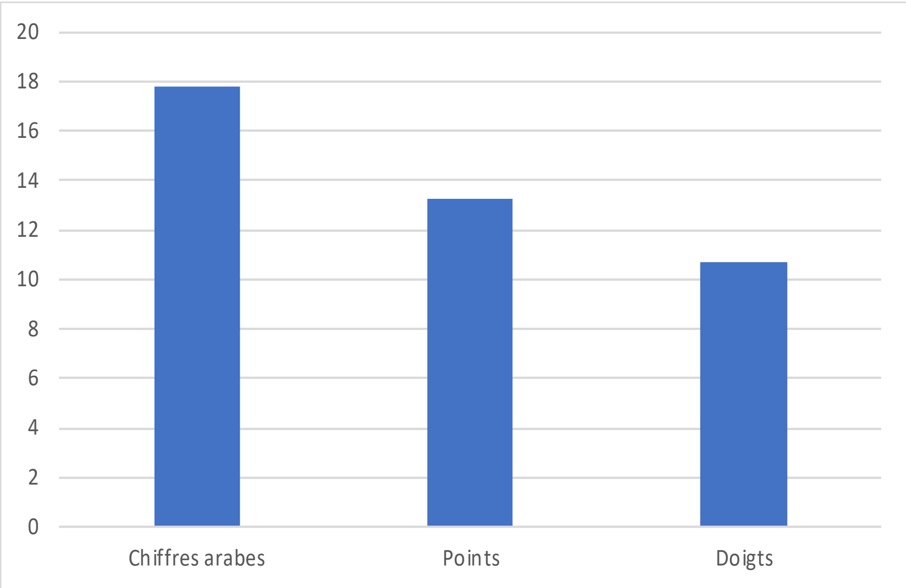

Figure 7 : Impact du format de la cible sur le taux de bonnes réponses

2.4. Liens amorce-cible

Enfin, nous nous sommes intéressés au lien « amorces - cibles » afin d'identifier des conditions qui favoriseraient la détection de numérosité identique (par exemple, est-ce qu'une amorce en chiffres permet de détecter plus rapidement une même quantité lorsque la cible est sous format de points ou de doigts). Cependant, aucune différence n'a pu être mise en évidence (ps $\leq .407$; figure 8).

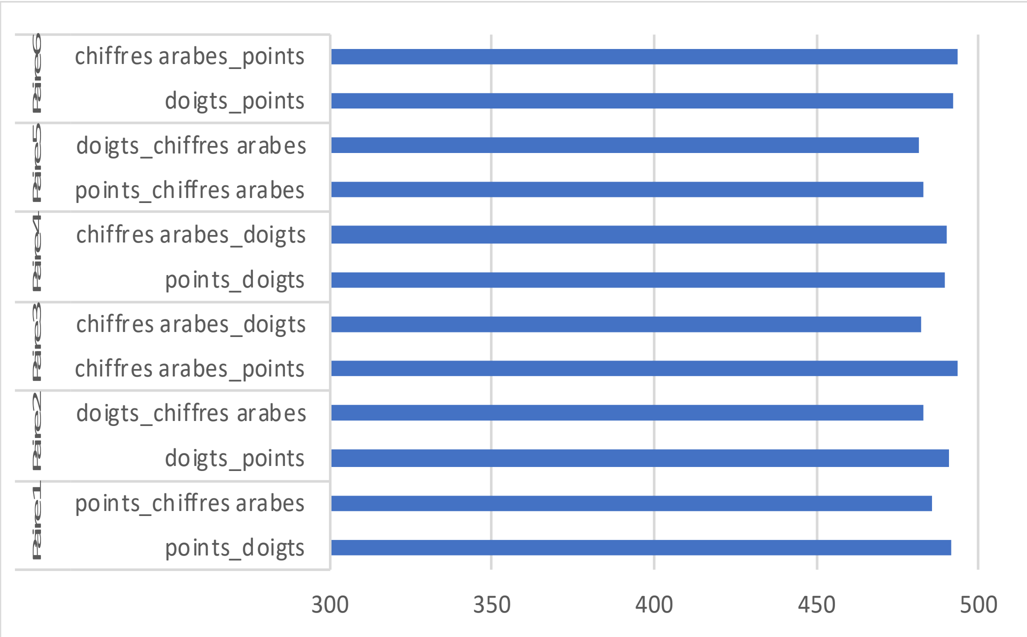

Figure 8 : Efficacité du lien « amorce - cible » dans la détection de numérosité identique

2.5. Impact des numérosités traitées

En ce qui concerne l'impact de la numérosité de la cible sur le temps de réponse, la figure 9 nous permet de constater différents éléments. En effet, le temps de réponse semble être raccourci lorsque la cible est un chiffre arabe compris entre « 2 » et « 4 ». Pour « 1 », les points sont plus vites reconnus et pour « 5 », il s'agit des doigts (c'est-à-dire lorsqu'il s'agit « d'une main »). Pour les doigts, le temps de réponse semble se réduire à mesure que la numérosité de la cible augmente. Pour des raisons techniques, les analyses complètes sur les numérosités n'ont pu être réalisées.

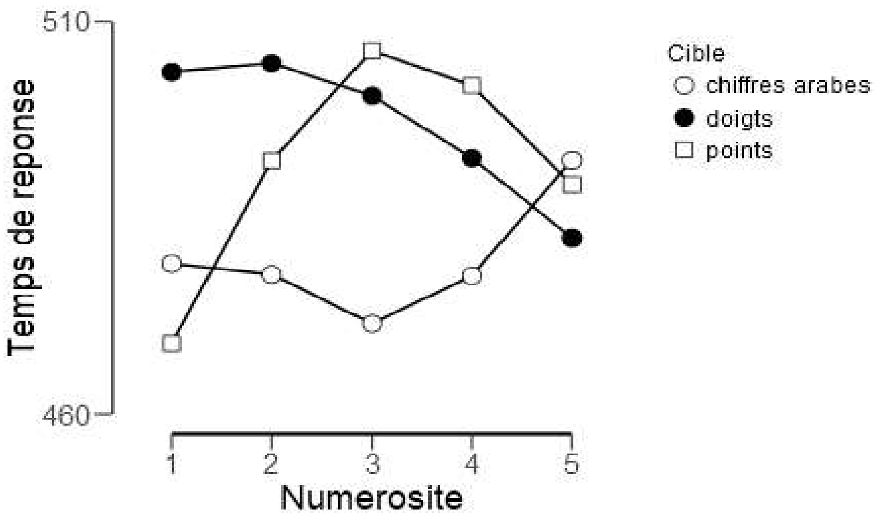

Figure 9 : Effet de la numérosité de la cible sur le temps de réponse

Discussion

Cette étude s'inscrit dans un projet plus large dont l'objectif est de recueillir des données sur l'importance des représentations des doigts dans la maîtrise des mathématiques. Nous nous sommes ici intéressés à l'impact de différents formats de présentation des numérosités dans le traitement des magnitudes. Nous avons donc cherché à montrer l'efficacité des doigts comme amorce, en opposition aux chiffres arabes et aux points organisés comme sur les faces d'un dé, lors d'une tâche de jugement d'égalité. Nous allons maintenant revenir sur les différents résultats afin de les discuter.

Gnosies digitales et performances arithmétiques

Nous avons pu mettre en évidence une faible corrélation entre les compétences arithmétiques et les gnosies digitales chez l'enfant. Cette corrélation signifie que les enfants ayant les meilleurs scores en arithmétique ont également les meilleurs scores en gnosies digitales. Pourtant, des auteurs qui ont utilisé ce même test pour tenter de mettre en évidence ce même lien, avaient conclu que compétences arithmétiques et compétences gnosiques n'étaient pas corrélées (Benton, Hutcheon et Seymour, 1951 ; Galifret-Granjont,1964). Cette différence de résultats peut s'expliquer par deux raisons. D'abord, nous n'ayons proposé que la première modalité de stimulation aux enfants. Ceux-ci, étant habitués par l'école à utiliser leurs doigts notamment lors de comptines, sont en général performants pour reconnaître leurs doigts de façon indépendante, ce qui n'est pas garanti pour des stimulations simultanées. Les résultats alors utilisés pour les gnosies seraient supérieurs aux capacités gnosiques réelles des enfants. La deuxième raison réside dans l'enseignement scolaire. En effet, dans l'école de nos participants, les différentes quantités de 1 à 10 ont été représentées sur leurs cahiers par des chiffres mais aussi des doigts dès la grande section, où le déroulement de la chaîne numérique a été entraîné avec support digital. Ce dernier élément appuie les conclusions de Gracia et ses collègues (2008) sur le fait qu'entraîner les gnosies digitales améliore également les compétences arithmétiques. De plus, nos participants entrent dans la période de surinvestissement de leurs doigts lors de tâches de calcul décrite par Domahs, Krinzinger et Willmes (2008). Les magnitudes puis les opérations deviennent donc visibles sur les doigts et porteuses de sens, tandis que la discrimination entre les doigts devient plus fine. Les deux compétences sont ainsi améliorées.

Gnosies digitales et jugement d'égalité

Une corrélation moyenne entre les performances en gnosies digitales et celles au jugement d'égalité a pu être mise en évidence. Ceci signifie qu'une bonne reconnaissance des doigts par stimulation tactile est en lien avec l'identification d'une égalité numérique entre deux représentations successives de formats différents. Puisque les doigts ont un rôle fonctionnel dans la mise en place du comptage d'après Crollen, Seron et Noël (2011), ils illustrent également les cinq principes de comptage (Gelman, 1983). Parmi ceux-ci, le principe de correspondance terme à terme consiste à attribuer un mot-nombre à un élément tandis que le principe d'ordre stable stipule que les mots-nombres sont toujours récités dans le même ordre. Le dernier mot-nombre prononcé renvoie alors à l'ensemble des éléments : c'est le principe de cardinalité. Ainsi, dans leurs expériences de comptage sur les doigts, les enfants ont associé un mot-nombre unique à chaque doigt, toujours en partant du pouce. Dès lors, on peut penser que si le majeur est stimulé par appui tactile, la magnitude associée au mot-nombre « trois » s'active automatiquement. Puisque ce mot-nombre doit également représenter un ensemble d'éléments, il est probable que les réseaux neuronnaux correspondants à la configuration canonique « trois » s'activent également. En effet, lors du test des gnosies digitales, certains enfants surélevaient instantanément et très légèrement le doigt stimulé mais aussi les précédents, produisant alors les configurations canoniques de doigts. De plus, le mot-nombre correspond à la représentation auditivo-verbale du modèle du triple-code (Dehaene, 1992). Ainsi, puisque les différentes représentations sont en constante interaction et que la visualisation de chiffres arabes active automatiquement les magnitudes associées, on peut conclure que l'élaboration du mot-nombre, même sans production orale, est également traduit en terme de magnitude. De ce point de vue, il semble effectivement pertinent, en accord avec Di Luca et Pesenti (2011), de considérer les configurations canoniques de doigts comme un autre type de représentation numérique à éventuellement intégrer au sein du modèle du triple-code.

Performances arithmétiques et jugement d'égalité

Nos résultats montrent une corrélation entre les performances arithmétiques et la capacité à indiquer une égalité numérique entre deux représentations successives de format différent. En effet, la réalisation de calculs écrits nécessite d'avoir associé correctement les magnitudes aux chiffres arabes correspondants. L'enfant sait donc que ces deux formats renvoient à la même numérosité. De plus, comme évoqué précédemment, nos participants ont été sensibilisés en classe à la représentation d'une même quantité sous formes de configurations canoniques de doigts, de chiffres et de points du dé. Les premières opérations arithmétiques ont ainsi été expliquées par le biais de ces différents formats, permettant de créer les liens sémantiques entre eux, ce qui est conforme aux conclusions de Di Luca et Pesenti (2011). Cependant, la corrélation mise en évidence reste faible. En effet, nos participants débutent les apprentissages formels et ont donc peu d'expériences sensori-motrices en ce qui concerne les configurations canoniques de doigts et leur magnitude associée. Ainsi, le temps nécessaire pour traiter les différents stimuli doit être supérieur à celui d'adultes, devenus experts dans l'utilisation et le passage d'un code à l'autre. La durée allouée aux enfants pour transmettre leurs réponses est alors trop courte, ce qui ne permet pas aux participants de fournir suffisamment de bonnes réponses à la tâche arithmétique. Le nombre d'égalités entre deux représentations différentes mais de même magnitude pourrait ainsi être augmenté si la vitesse d'enchaînement des stimuli était réduite. La corrélation s'en trouverait alors renforcée.

Toutefois, les différents résultats nous permettent de valider l'hypothèse d'une corrélation entre capacités arithmétiques, gnosies digitales et identification de l'égalité numérique entre deux représentations différentes présentées successivement. Autrement dit, un enfant qui a réussi les deux premières tâches sera plus performant lors d'une tâche de jugement d'égalité.

Taux de réponse à la tâche expérimentale informatisée

Nous n'avons obtenu que 17% d'égalités identifiés (c'est-à-dire d'appuis opportuns lorsque deux représentations successives renvoient à la même magnitude), ce qui est un faible score. Ceci peut s'expliquer par la vitesse trop élevée d'enchaînement des stimuli. En effet, en fin de passation, plusieurs enfants ont expliqué avoir vu certaines égalités mais que le temps de réponse était trop court. Cette remarque n'est pas surprenante : puisque les enfants n'ont pas automatisé les liens sémantiques entre les différents formats, ils doivent d'abord décrypter la magnitude en jeu avant de pouvoir effectuer la tâche demandée, ce qui leur demande plus de temps que 600 millisecondes. D'ailleurs, certains enfants ont commencé la tâche informatisée en dénommant spontanément à voix haute les différentes magnitudes présentées. Ainsi, nous avons pu nous rendre compte que les magnitudes étaient correctement identifiées mais avec un délai. Par exemple, le mot-nombre correspondant à la magnitude d'un stimuli était produit très légèrement avant apparition du stimuli suivant, provoquant petit à petit un décalage entre la magnitude observée et la magnitude que l'enfant est en train de traiter. Ainsi, lorsque l'enfant réalise qu'il aurait dû indiquer l'égalité entre deux formats de représentation successifs et différents, la cible n'est déjà plus affichée. Dès lors, soit l'enfant ne répond pas, soit sa réponse, fournie trop tard, est répertoriée comme mauvaise réponse.

Effet de l'amorce

Selon nos analyses, il n'y a pas d'effet significatif du format de l'amorce sur le temps de réponse. Autrement dit, les trois formats (c'est-à-dire points, doigts et chiffres arabes) sont traités à la même vitesse par les enfants. Aucun format ne nécessitant de temps supplémentaire pour être traité, on peut donc affirmer qu'ils sont maîtrisés au même niveau par les enfants, n'impactant pas l'accès à la magnitude. Ceci rejoint les conclusions rapportées par la littérature scientifique. En effet, grâce à un paradigme de Stroop, Dehaene et Akhavein (1995) ont montré que les chiffres arabes, comme les représentations analogiques (c'est-à-dire les ensembles de points), se place sur une ligne numérique mentale et ainsi, les magnitudes étaient automatiquement activées lors de la présentation de chiffres arabes. Quant aux configurations canoniques de doigts, l'étude de Di Luca, Lefèvre et Pesenti a montré qu'elles se placent, elles-aussi sur une ligne numérique mentale (2010). De plus, dans notre tâche expérimentale informatisée, les points ne sont pas organisés aléatoirement mais à la manière des faces d'un dé, ce qui leur confère un statut symbolique. Ceci signifie qu''ils sont porteurs de sens, à la manière des configurations canoniques de doigts. Ainsi, les trois formats utilisés ici en amorçage permettent d'accéder automatiquement aux différentes magnitudes, ce qui explique l'absence de différence dans le temps de traitement. Ainsi, ces données réfutent notre hypothèse postulant que l'amorce par les chiffres arabes serait la plus efficace pour juger d'une égalité numérique entre deux représentations différentes.

Effet de la cible

Tout comme pour l'amorce, il n'y a pas d'effet significatif du format de la cible sur le temps de réponse des participants. Ni les points organisés comme les faces d'un dé, ni les configurations canoniques de doigts ni les chiffres arabes ne permettent une réponse plus rapide quand ils sont en position de cible. D'une certaine manière, ceci accrédite notre hypothèse selon laquelle le temps de réponse pour les modalités points et doigts serait similaire mais pas comme nous l'espérions. En effet, nous pensions que le temps de traitement des chiffres arabes serait inférieur aux deux autres, ce qui n'est pas le cas. En effet, les trois formats de présentation sont traités avec la même vitesse par les enfants, ce qui signifie qu'aucun format n'est facilitateur dans le traitement des petites quantités.

En revanche, nous avons mis en évidence un effet significatif du format de la cible sur le taux de bonnes réponses. Les chiffres arabes sont plus souvent reconnus que les points, eux-mêmes mieux reconnus que les configurations canoniques de doigts. Cette meilleure reconnaissance des chiffres peut s'expliquer par la fréquence de présentation et d'utilisation de ceux-ci. En effet, ce format est présent partout dans le quotidien des enfants : le micro-onde, les horloges digitales, le téléphone ou la tablette des parents, la date écrite au tableau dans la classe, pour ceux pratiquant un sport tel que le basket ou le football, le tableau des scores... De plus, lors des exercices ou évaluations de mathématiques proposées à l'école, le format de la réponse attendue correspond le plus souvent aux chiffres arabes, plus rarement sous forme de points et occasionnellement les configurations canoniques de doigts, si l'évaluation est orale.

Le format des points organisés à la manière des faces d'un dé arrive en deuxième position du nombre de bonnes réponses. Cette organisation canonique confère une dimension symbolique à ce format, ce qui permet de rapidement reconnaître la magnitude à traiter. Cependant, si nos participants ne sont pas régulièrement en contact avec des dés, par le biais de jeux de société par exemple, ils ne peuvent s'approprier ce codage symbolique avec autant de facilité qu'avec les chiffres arabes. En effet, dans le langage, un même symbole peut être interprété différemment en fonction des populations. Il existe donc une part d'apprentissage implicite par reproduction de l'organisation des points. Si l'on proposait à un enfant de montrer à l'aide de jetons la magnitude 3, on ne peut pas avec certitude affirmer qu'il placera ses trois jetons comme sur un dé. Certains enfants organiseraient leurs jetons horizontalement, verticalement, de manière à débuter un carré ou à tracer un triangle (Mandler et Shebo, 1982). Sans questionnaire préalable sur les habitudes de jeu des participants ni observation de leur manière d'organiser des jetons en fonction des magnitudes, nous ne pouvons déterminer si nos configurations de points correspondent à leurs habitudes de symbolisation.

Pour finir, les configurations canoniques de doigts récoltent la plus petite part des bonnes réponses. Il s'agit effectivement d'un format peu présent au quotidien sur le versant réceptif mais qui s'acquiert au travers d'expériences sensori-motrices. Or, nos participants débutent ces expériences en question, ce qui ne permet pas encore de reconnaître avec précision les différentes configurations canoniques de doigts. De plus, certains sujets étant gauchers, ce dernier format ne correspondait finalement pas à leur utilisation de doigts, rendant l'identification de la magnitude cible plus difficile. Ceci est également susceptible d'avoir engendré des erreurs ou des non-réponses. Nous ne pouvons cependant pas, avec nos données chiffrées, distinguer les erreurs attribuables à la latéralité des participants de celles propres au format de la cible. Pour les recherches futures portant sur ce protocole et pour éviter ce biais, nous pouvons imaginer ajouter dans les critères d'inclusion que les participants doivent être droitiers.

Liens amorce-cible

Suite à nos analyses, aucune paire amorce-cible n'a pu être identifiée comme permettant une reconnaissance plus rapide d'une même magnitude. Compte-tenu de nos résultats précédents, cette donnée n'est pas surprenante. En effet, il n'y a ni effet du format de l'amorce, ni effet du format de la cible sur le temps de réponse. Doigts, points et chiffres arabes sont reconnus avec la même vitesse par nos participants ce qui explique qu'aucune paire ne se démarque des autres en terme d'efficacité de réponse. Ainsi, bien que le format des cibles sous forme de chiffres arabes permette à priori d'identifier plus de bonnes réponses, ceci n'est pas en lien avec l'amorce, quel que soit son format de présentation. Autrement dit, dans notre étude, les doigts ne permettent pas un traitement plus rapide ni précis des numérosités, ce qui met en doute la pertinence d'enseigner les mathématiques en utilisant le support digital. En effet, en plus de ne pas permettre un traitement plus rapide, les configurations canoniques de doigts sont moins précisément identifiées que les autres formats de cible. Toutefois, les différentes corrélations mises en évidence entre les capacités arithmétiques et gnosiques et les performances à la tâche expérimentale informatisée confirment que les doigts peuvent aider au développement des compétences mathématiques, sans être tout à fait nécessaires.

Effet de la numérosité

Nos résultats ont mis évidence des différences sur le temps de réponse en fonction de la numérosité. Certaines sont plus vite reconnues sous forme de points organisés comme les surfaces d'un dé (numérosité 1), d'autres sous forme de configurations canoniques de doigts (numérosité 5) et les dernières sous forme de chiffres arabes (les numérosités 2 à 4). Pour les doigts, le temps de réponse se réduit au fur et à mesure que la numérosité augmente. La numérosité 5 représente en effet une main complète que les enfants repèrent rapidement. On peut supposer que les enfants traitent alors les configurations canoniques de doigts en fonction du nombre de doigts restant pour compléter la main. Ainsi, pour la numérosité de 4, il ne manque qu'un seul doigt pour parvenir à une main complète. Plus il y a de doigts affichés, plus l'image se rapproche de la main complète, plus le traitement est rapide. Ainsi, le traitement de la numérosité 1 par les doigts est le plus long. Pour les points organisés à la manière des faces d'un dé en revanche, le temps de réponse augmente avec l'accroissement de la numérosité, ce qui indique un traitement de ces quantités par subitizing et non par reconnaissance des symboles. On peut cependant observer une réduction du temps de réponse après la magnitude 3. En effet, la magnitude 4 est représentée par quatre points formant un carré qui une forme très facilement reconnaissable : la dimension symbolique prend ici le pas sur le subitizing. Enfin, pour la numérosité 5, la vitesse est encore réduite grâce au point supplémentaire au cœur du carré. Pour les autres numérosités de 2 à 4, ce sont les chiffres arabes qui permettent le traitement le plus rapide. Ceci est en accord avec les conclusions de Dehaene et Akhavein (1995) indiquant que l'accès aux magnitudes se produit automatiquement lors de la présentation de chiffres arabes.

Discussion générale

Durant l'ensemble de l'administration du protocole, les participants se sont investis sérieusement et ont fait de leur mieux pour donner le plus de bonnes réponses possibles. Le faible pourcentage de bonnes réponses obtenus à la tâche expérimentale informatisée ne peut donc pas être attribué à un manque de motivation des sujets. De même, les enfants ont su reformuler la consigne avec leurs mots, même à distance de la première session. Ceci exclut un défaut de compréhension de la tâche à accomplir. En revanche, la vitesse d'enchaînement des stimuli semble avoir mis les enfants en difficulté. En effet, cette vitesse détermine également le temps alloué aux participants pour répondre. Plusieurs d'entre eux ont avoué avoir vu à plusieurs reprises la même magnitude apparaître successivement sous deux formats différents mais ne pas avoir eu le temps de répondre. Ainsi, pour obtenir des résultats plus complets et effectuer des analyses plus fiables, il serait intéressant de proposer à nouveau cette tâche expérimentale informatisée, en allongeant la durée d'affichage des stimuli. En effet, les enfants n'ont pas encore assez d'expériences pour avoir pu automatiser le passage entre les différents codes de quantité et pouvoir le mettre en pratique dans un paradigme d'amorçage calibré, au départ, pour des adultes.

De plus, les configurations canoniques de doigts utilisées dans la tâche expérimentale informatisée n'illustrent que l'utilisation faite par les droitiers, ce qui pourrait avoir lésé les participants gauchers. Pour ôter ce doute, deux pistes peuvent être proposées. La première serait de proposer la même tâche aux gauchers mais en utilisant des configurations canoniques de doigts conformes à leur latéralité. La seconde serait d'exclure les participants gauchers, ce qui serait bien moins coûteux en temps que d'adapter la tâche mais discutable au niveau d'un point de vue éthique.

Ce protocole a été appliqué qu'à un niveau scolaire précis dans l'optique de récolter des informations sur l'utilisation des doigts au début des apprentissages formels mathématiques. Cependant, ce type d'étude ne permet pas d'observer d'évolution dans les différentes compétences évaluées (capacités en arithmétique et en gnosies digitales et performance dans l'identification d'une égalité numérique entre deux formats différents présentés successivement), ce qui fournirait des informations sur la pertinence de l'utilisation du support digital dans l'enseignement des mathématiques. Il serait donc intéressant de proposer l'ensemble de ce protocole à des enfants scolarisés en classe préparatoire puis de faire de nouvelles passations à une ou deux années d'intervalle voire plus. Les performances réalisées en termes de vitesse et d'exactitude de réponses à la tâche expérimentale informatisée pourraient ainsi être comparées entre les différents niveaux scolaires pour les formats doigts, points et chiffres arabes. De plus, une étude conduite sur une plus longue durée et sur un plus grand échantillon permettrait éventuellement de recueillir des informations utiles pour le repérage précoce de troubles des apprentissages portant sur les mathématiques.

Conclusion

Le but de ce projet était d'enrichir les connaissances actuelles sur l'impact des configurations de doigts dans l'apprentissage des mathématiques. Cette étude s'inscrit dans un projet plus large et fait suite aux expérimentations menées chez de jeunes adultes. L'objectif du protocole mis en place était d'étudier si les configurations de doigts menaient à un meilleur traitement des quantités dans une tâche de comparaison.

Pour cela, dans un premier temps, nous avons testé la relation entre les compétences en arithmétique et celles concernant les gnosies digitales. Dans un second temps, nous avons confronté ces résultats à ceux obtenus suite à la manipulation informatique. Celle-ci consistait en une tâche de jugement comparatif de petites quantités, mettant en jeu des configurations de doigts, des chiffres arabes et les patterns de points.

A la suite de la première phase, nous avons pu vérifier que les compétences en gnosies digitales et en arithmétiques étaient corrélées entre elles mais aussi avec la capacité d'identifier une égalité numérique entre deux représentations différentes présentées successivement. En revanche, la tâche expérimentale informatisée n'a pas permis de mettre en évidence de format plus efficace pour le traitement des quantités, qu'il s'agisse de points, de doigts et de chiffres arabes.

Cependant, ces résultats ne suffisent pas pour infirmer la pertinence du support digital dans le développement des capacités mathématiques. En effet, les enfants passeraient par une période d'investissement excessif de leurs doigts lors de l'apprentissage des compétences mathématiques (Domahs, Krinzinger, Willmes, 2008). Une fois maîtrisés, les doigts permettent alors de soulager la mémoire de travail et d'aider au calcul.

Nous estimons que si le protocole informatique était modifié pour s'adapter aux capacités des enfants, notamment en terme de vitesse de traitement, les résultats obtenus seraient plus fiables. De plus, inclure des enfants de niveau scolaire plus avancé et comparer leurs performances sur l'ensemble du protocole mettrait peut-être en lumière une évolution dans l'efficacité des doigts pour traiter les quantités et donc apporter de nouvelles informations concernant leur utilité dans l'enseignement des mathématiques mais aussi des indices pour le repérage précoce de troubles des apprentissages.

Bibliographie

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

Antell, S. E., & Keating, D. P. (1983). Perception of numerical invariance in neonates. *Child Development*, *54*(3), 695-701.

Barber, I., & Wright, H. A. (2001). How strong are familiarity preferences in shoaling fish? *Animal Behaviour*, *61*(5), 975-979.

Benton, A.L. (1992). Gerstmann's Syndrome. *Archives of Neurology*, 49, 445-447.

Benton, A. L., Hutcheon, J. F., & Seymour, E. (1951). Arithmetic ability, finger-localization capacity and right-left discrimination in normal and defective children. *American Journal of Orthopsychiatry*, *21*(4), 756-766.

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

Cabrejo-Parra, E. (1992), Deixis et opérations symboliques. In L. Danon-Boileau & M.-A. Morel (Eds.), La deixis. Paris : PUF.

Cantlon, J. F., & Brannon, E. M. (2006). Shared System for Ordering Small and Large Numbers in Monkeys and Humans. *Psychological Science*, *17*(5), 401-406.

Cook, S. W., Mitchell, Z., & Goldin-Meadow, S. (2008). Gesturing makes learning last. *Cognition*, *106*(2), 1047-1058.

Crollen, V., Seron, X., Noël, M.P. (2011). Is finger-counting necessary for the development of arithmetic abilities? *Frontiers in Psychology*, *2*.

De Smedt, B., Janssen, R., Bouwens, K., Verschaffel, L., Boets, B., & Ghesquière, P. (2009). Working memory and individual differences in mathematics achievement: A longitudinal study from first grade to second grade. *Journal of Experimental Child Psychology*, *103*(2), 186-201.

De Vos, T. (1992). Tempo Test Rekenen. Berkhout Nijmegen.

Dehaene, S. (1992). Varieties of numerical abilities. *Cognition*, *44*(1-2), 1-42.

Dehaene, S. (2001). Precis of The Number Sense. *Mind and Language*, *16*(1), 16-36.

Dehaene, S. (2010). *La bosse des maths: quinze ans après* (Nouv. édition revue et augmentée). Paris: O. Jacob.

Dehaene, S., & Akhavein, R. (1995). Attention, automaticity, and levels of representation in number processing. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *21*(2), 314-326.

Dehaene, S., Bossini, S., & Giraux, P. (1993). The mental representation of parity and number magnitude. *Journal of Experimental Psychology: General*, *122*(3), 371-396.

Dehaene, S. et Cohen, L. (2000). Un modèle anatomique et fonctionnel de l'arithmétique mentale. In M. Pesenti & X. Seron (Eds.), *Neuropsychologie des troubles du calcul et du traitement des nombres* (pp. 191-232). Marseille : Solal.

Dehaene, S., & Cohen, L. (2007). Cultural Recycling of Cortical Maps. *Neuron*, *56*(2), 384-398.

Dehaene, S., Piazza, M., Pinel, P., & Cohen, L. (2003). THREE PARIETAL CIRCUITS FOR NUMBER PROCESSING. *Cognitive Neuropsychology*, *20*(3-6), 487-506.

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

Di Luca, S. D., Lefèvre, N., & Pesenti, M. (2010). Place and summation coding for canonical and non-canonical finger numeral representations. *Cognition*, *117*(1), 95-100.

Di Luca, S., & Pesenti, M. (2011). Finger Numeral Representations: More than Just Another Symbolic Code. *Frontiers in Psychology*, *2*.

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*(4), 359-367.

Fayol, M., Barrouillet, P., Marinthe, C. (1998). Predicting arithmetical achievement from neuro-psychological performance: a longitudinal study. *Cognition*, *68*(2), B63-B70.

Fayol, M., Chazoule, G. & Fanget, M. (2006). Le langage et les opérations arithmétiques. In P. Dessus, E. Gentaz (Eds.), Apprentissages et enseignement. Sciences cognitives et éducation (pp. 75-89). Paris : Dunod.

Fischer, J.-P. (2010). Numerical performance increased by finger training: A fallacy due to regression toward the mean? *Cortex*, *46*(2), 272-273.

Galifret-Granjon, N. (1964). Tests des gnosies digitales. In : Organisation temporelle et spatiale. Paris, Delachaux & Niestlé, 2 : 57-85.

Geary, D. C., & Wiley, J. G. (1991). Cognitive addition : Strategy choice and speed-of-processing differences in young and elderly adults. *Psychology and Aging,* 6(3), 474-483.

Gelman, R. (1983). Les bébés et le calcul. *La recherche*, 149(14), 1382-1389.

Gerstmann, J. (1940). SYNDROME OF FINGER AGNOSIA, DISORIENTATION FOR RIGHT AND LEFT, AGRAPHIA AND ACALCULIA: LOCAL DIAGNOSTIC VALUE. *Archives of Neurology & Psychiatry*, *44*(2), 398.

Ghesquière P., Ruijssenaars, A. (1994). Vlaamse normen voor studietoetsen Rekenen en technisch lezen lager onderwijs. Flemish standards for study evaluation of mathematics and technical reading in primary school. Leuven : K.U.L.-C.S.B.O.

Goldin-Meadow, S. & Butcher, C. (2003). Pointing toward two-word speech in young children. In S. Kita (Eds), Pointing: where language, culture, and cognition meet. Hillsdale NJ : Erlbaum.

Gordon, P. (2004). Numerical Cognition Without Words: Evidence from Amazonia. *Science*, *306*(5695), 496-499.

Gracia-Bafalluy, M.., & Noel, M. (2008). Does finger training increase young children's numerical performance? *Cortex*, 44(4), 368-375.

Houdé, O., Mazoyer, B., & Tzourio-Mazoyet, N. (2002). *Cerveau et psychologie : Introduction à l'imagerie cérébrale anatomique et fonctionnelle*. PUF.

JASP Team (2018). JASP (Version 0.9)[Computer software].

Kinsbourne, M., & Warrington, E. K. (1963). The developmental Gerstmann syndrome. *Archives of Neurology*, *8*, 490-501.

Lafay, A., Thevenot, C., Castel, C., & Fayol, M. (2013). The role of fingers in number processing in young children. *Frontiers in Psychology*, *4*.

Lemer, C. (2003). Acalculies. Un examen rapide (mais réfléchi) du calcul. *Neurologies*, 6, 234 – 239.

Lochy, A., & Censabella, S. (2005). Le système symbolique arabe : acquisition, évaluation et pistes rééducatives. In M-P. Noël (Eds), La dyscalculie (pp. 77104). Marseille : Solal.

Mandler, G., & Shebo, B. J. (1982). Subitizing: an analysis of its component processes. *Journal of Experimental Psychology*: General, 111, 1-22.

Mechner, F. (1958). Probability Relations within Response Sequences under Ratio Reinforcement1. *Journal of the Experimental Analysis of Behavior*, *1*(2), 109-121.

McNeill, D. (1985). So you think gestures are nonverbal? *Psychological Review*, *92*(3), 350-371.

McNeill, D. (1995). *Hand and mind: what gestures reveal about thought*. Chicago London: The Universoty of Chicago Press.

Moyer, R. S., & Landauer, T. K. (1967). Time required for Judgements of Numerical Inequality. *Nature*, *215*(5109), 1519-1520.

Noël, M.-P. (2005). Finger gnosia: a predictor of numerical abilities in children? *Child Neuropsychology*, *11*(5), 413-430.

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*, 877.

Pica, P., Lemer, C., Izard, V., & Dehaene, S. (2004). Exact and approximate arithmetic in an Amazonian indigene group. *Science (New York, N.Y.)*, *306*(5695), 499-503.

Rizzolatti, G., Fadiga, L., Gallese, V., & Fogassi, L. (1996). Premotor cortex and the recognition of motor actions. *Brain Research. Cognitive Brain Research*, *3*(2), 131-141.

Roggeman, C., Verguts, T., & Fias, W. (2007). Priming reveals differential coding of symbolic and non-symbolic quantities. *Cognition*, *105*(2), 380-394.

Sato, M., Cattaneo, L., Rizzolatti, G., & Gallese, V. (2007). Numbers within Our Hands: Modulation of Corticospinal Excitability of Hand Muscles during Numerical Judgment. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *19*(4), 684-693.

Starkey, P., & Cooper, R. G. (1980). Perception of numbers by human infants. *Science (New York, N.Y.)*, *210*(4473), 1033-1035.

Liste des annexes