



Université Lille 2
Droit et Santé



Institut d'Orthophonie
Gabriel DECROIX

MEMOIRE

En vue de l'obtention du
Certificat de Capacité d'Orthophonie
présenté par :

Flore Bourgeois

soutenu publiquement en juin 2016 :

**L'importance de la représentation des doigts
dans la maîtrise de l'arithmétique.**

MEMOIRE dirigé par :

Sandrine Mejias, Maître de conférence, Département d'orthophonie, Université de Lille

Lille – 2016

Remerciements

Pour la réalisation de ce mémoire, je tiens à remercier particulièrement ma maîtresse de mémoire, Sandrine Mejias, pour avoir soutenu mon travail, pour sa disponibilité et sa gentillesse ainsi que l'université de Lille 3 qui m'a prêté le matériel de test. Je remercie également ma pré-lectrice Elodie Heugebaert pour sa relecture attentive.

Je remercie aussi Yassine Fikrat pour ses talents informatiques et sa patience, Elodie Byscoulette pour son précieux soutien moral et Laurent Fontaine pour ses dépannages logistiques.

Je remercie également chaudement tous les participants du test pour leur bonne volonté.

Enfin je remercie ma famille et mes amis pour leurs encouragements.

Résumé :

Notre recherche s'inscrit dans le domaine des cognitions mathématiques. Elle étudie le lien intermédiaire qui existerait entre les représentations verbales et visuelles du nombre et leur représentation analogique : les doigts (Fayol et Seron, 2005). Elle vise à évaluer l'importance de la représentation des doigts dans la maîtrise de l'arithmétique. Est-ce que les doigts sont un support cohérent pour l'apprentissage de l'arithmétique ?

Pour répondre à cette problématique, nous avons établi un protocole expérimental qui évalue le niveau arithmétique, les gnosies digitales. Nous avons élaboré une épreuve informatique de comptage non symbolique dans laquelle l'efficacité du support des doigts est mise à l'épreuve.

Nos sujets sont de jeunes adultes puisque notre étude est aux prémices de la validation du protocole, dont la visée pédagogique est destinée à des enfants.

Les résultats du test informatique de comptage, qui oppose la condition doigts à la condition pions et teste l'influence de la position des mains du sujet et la position de l'écran dans l'espace, montrent que chez nos jeunes adultes, les doigts ne se sont pas révélés comme un meilleur support que les pions.

Toutefois, ces résultats ne sont pas suffisants pour réfuter que les doigts soient un support cohérent à présenter aux enfants pour soutenir le développement des compétences arithmétiques. En effet, dans la littérature qui porte sur la cognition numérique, il est établi que les doigts jouent un rôle fonctionnel dans le développement d'un système de comptage en tant qu'outil de la cognition incarnée (Crollen, Seron, Noël, 2011).

Mots-clés :

Cognitions mathématiques

Doigts

Recherche

Jeunes adultes

Abstract :

In the field of mathematics cognitions, the present study studied an intermediate link which might exist between verbal, visual representations of numbers and their numerical magnitude: finger-counting (Fayol and Seron, 2005). It tested the importance of finger-counting for the development of arithmetic abilities. Is finger-counting a consistent support for learning arithmetic?

To address this issue, we have established an experimental protocol that assesses arithmetic, finger gnosis and have developed a non-symbolic counting computer test in which the efficiency of the finger-based support is tested.

This protocol has an educational aim, intended to children. Since our study leads to the validation of the protocol, our subjects are young adults.

The results of the counting computer test, which opposes fingers counting to dot counting and tests the effect of hand position and screen position, show that for our young adult subjects, fingers have not proven as better support than dots.

However, these results are not sufficient to deny that finger counting is a consistent medium to support the development of arithmetic for children. Indeed, in the literature on numerical cognition, it is assumed that fingers play a functional role in the development of the counting system as a tool of embodied cognition (Crollen, Seron, Christmas, 2011).

Keywords:

Numerical cognition

Finger counting

Research

Young adults

Table des matières

Introduction	1
Contexte théorique, buts et hypothèses	4
1. Les habiletés numériques	5
1.1. Les représentations préconventionnelles	5
1.2. Les pratiques numériques	5
1.3. La sémantique des nombres et les habiletés de calcul	6
1.4. Les connaissances factuelles sur les nombres	6
1.5. Les modèles du traitement du nombre	6
1.6. L'effet de distance et de la taille	8
2. Les doigts comme code symbolique des quantités	9
2.1. Les configurations canoniques des doigts	10
2.2. Les doigts et le traitement « place coding »	11
3. La relation entre les compétences numériques et les gnosies digitales	12
3.1. Hypothèse localisationniste	12
3.2. Hypothèse de recyclage neuronal	13
3.3. Hypothèse fonctionnelle	14
3.3.1. Le syndrome de Gerstmann développemental	15
3.4. Liens doigt-nombre dans le développement de l'enfant	17
3.4.1. Le rôle des doigts dans le système de comptage et de calcul	17
3.4.2. Le poids de prédiction des performances perceptivo tactiles	18
3.4.3. Entraîner à la différenciation des doigts pour améliorer les compétences mathématiques	20
3.4.4. Les représentations des doigts dans le calcul mental chez les enfants	21
3.5. L'influence des représentations des doigts chez les adultes	23
3.5.1. Le rôle des doigts dans les associations spationumériques, preuve de l'« embodied cognition »	23
3.5.2. Preuves neuroscientifiques de l'association doigt-nombre	26
4. Buts et hypothèses	28
Sujets, matériel et méthode	30
1. Sujets	31
1.1. Critères d'inclusion	31
1.2. Critères d'exclusion	31
2. Matériel	32
2.1. Le questionnaire de latéralité manuelle	33
2.2. Les tests des gnosies digitales	34
2.3. Le test des compétences arithmétiques	35
2.4. Le test informatique	36
Résultats	40
1. Analyses générales	41
1.1. Performances arithmétiques versus gnosies digitales	41
1.2. Performances arithmétiques versus performances au test informatique	42
2. Analyses de la partie expérimentale informatique	43
2.1. Conditions doigts versus pions	43
2.2. En condition doigts, configuration canonique versus non canonique	43
2.3. En condition canonique ou congruente, doigts versus pions	44
2.4. En condition doigts, mains sur les genoux versus mains dans le dos	44
2.5. En condition doigts, espace proche versus espace lointain	44

Discussion	46
1. Interprétation des résultats.....	47
1.1. Tendance à la corrélation entre les performances en arithmétiques et en gnosies digitales.....	47
1.2. Pas de corrélation entre les performances arithmétiques et les performances à l'épreuve informatisée	49
1.3. Meilleures performances pour la condition pions que pour la condition doigts	52
1.4. Meilleures performances pour les configurations canoniques de la condition doigts	55
1.5. Pas d'effet de la position des mains ou de la position de l'écran.....	56
Conclusion	58
Bibliographie	61
Liste des annexes	67
Annexe n°1 : Formulaire de consentement de participation.....	67
Annexe n°2 : Première épreuve du protocole arithmétique Shalev.....	67

Introduction

En tant qu'humains, nous naissons avec des intuitions sur le nombre, la logique, la géométrie de l'espace... Par le langage et le développement de systèmes symboliques, nous avons la possibilité de construire les extensions de ces systèmes fondamentaux et faire des liens entre eux. Au cours des siècles, les mathématiciens ont généré un grand nombre de telles constructions culturelles (Dehaene, 2002). Elles ont ensuite été sélectionnées selon des critères variés tels que leur non-contradiction, leur simplicité, leur élégance, mais aussi selon leur capacité à « capturer » les phénomènes physiques. Cette vue darwinienne de l'histoire des mathématiques pourrait partiellement rendre compte de l'efficacité des mathématiques de nos jours.

À l'occasion du cent dixième anniversaire de la naissance de Piaget (1896-1980), on peut rendre compte d'un vrai dépoussiérage des conceptions dans le domaine des mathématiques. Les recherches expérimentales qui ont été menées ces dernières années sur le nombre, le calcul et la résolution de problèmes ont abouti à l'établissement de données théoriques et ont ébranlé la conception de Piaget des logico-mathématiques qui dominait les approches rééducatives lors de la seconde moitié du XXe siècle. On procède à un élargissement théorique qui s'intéresse au domaine plus complexe et plus vaste de la cognition mathématique et ainsi, on reconnaît que ce domaine recouvre des activités très diverses qui impliquent de nombreuses fonctions cognitives différentes.

La théorie de Piaget du développement des conduites logiques a stimulé de nombreuses recherches, de débats et de discussions autour des conceptions développées par l'auteur dans le domaine de la psychologie de l'enfant. Plusieurs critiques (Ménissier, 2014) ont permis de reconsidérer le terme de développement cognitif et le modèle de progression par stades qui sous-estime la construction des systèmes de représentation. Selon Piaget, les représentations sont subordonnées aux actions et aux opérations alors que dans l'approche cognitiviste, les représentations orientent les opérations.

La représentation des connaissances dans la mémoire s'envisage alors comme d'une part, les formats de représentations, c'est-à-dire la forme de leur codage et de leur stockage, d'autre part les connaissances déclaratives et procédurales et enfin les modes d'organisation des connaissances qui connectent toutes les représentations les unes aux autres.

Le développement du nombre chez l'enfant ne fait pas l'objet d'un consensus (Fayol et Seron, 2005). Avant l'acquisition du langage, les enfants posséderaient des compétences numériques très précoces, peut-être innées, pour se représenter de manière non symbolique, mais très précisément, de faibles quantités, et même approximativement de grandes quantités. Avec l'apparition du langage, l'enfant apprend à compter et intègre des représentations numériques verbales qui ne sont au début pas toujours très bien associées aux représentations analogiques, et ensuite des représentations visuelles indo-arabes. Fayol et Seron (2005) s'interrogent alors sur la nature du lien qui pourrait unir ces deux systèmes, l'un verbal et l'autre non.

Ce lien intermédiaire, appelé « missing link », pourrait être l'utilisation des doigts et des mains.

Contexte théorique, buts et hypothèses

L'arithmétique traite de toutes les opérations (lecture, écriture, calculs, transformations) qui s'appuient sur un codage symbolique des quantités (Pesenti et al ; 2014).

Comment les sciences cognitives abordent-elles l'arithmétique ? Quelles compétences sont en jeu dans le fonctionnement cognitif normal du nombre ? Comment les modèles cognitifs les présentent-ils dans une perspective anatomofonctionnelle ? C'est ce que nous présenterons dans une première partie.

1. Les habiletés numériques

Différents types de connaissances contribuent au fonctionnement cognitif du nombre. Il est possible de regrouper ces habiletés de traitement numérique en quatre grandes catégories (Le bel Beauchesne et al., 2009).

1.1. Les représentations préconventionnelles

Les représentations préconventionnelles mènent à la représentation mentale analogique des quantités : le système approximatif du nombre (SAN) (Fayol, 2012).

L'intuition des quantités numériques se développe très tôt. Des chercheurs ont montré que les enfants de 6 mois sont capables de discriminer des quantités non symboliques dans un rapport de 1 : 2 (7 versus 14 mais non 7 versus 13). Elle s'améliore autour de la période préscolaire et continue à évoluer après les débuts de l'enseignement scolaire (Libertus, 2009).

1.2. Les pratiques numériques

Implicitement, par des expériences et en s'appuyant sur l'observation des comportements de l'entourage vient l'apprentissage de pratiques numériques. Il est prolongé par un apprentissage explicite dans un contexte scolaire, d'un code verbal ainsi que, dans notre culture, d'un code de chiffres indo-arabes qui associe directement les concepts numériques aux unités qui leur correspondent. Les habiletés développées peuvent être divisées en deux catégories : les habiletés de traitement des nombres et les habiletés de calcul proprement dites (Le bel Beauchesne et al ; 2009).

1.3. La sémantique des nombres et les habiletés de calcul

Le traitement des nombres permet l'accès à leur sémantique, ce qu'on appelle leur représentation analogique. Cette représentation permet d'effectuer des activités telles que le comptage et le transcodage (Le bel Beauchesne et al. ; 2009).

L'acquisition de la représentation analogique du nombre est à la base des habiletés de calcul élémentaire et complexe. Plusieurs types de connaissances contribuent au traitement mathématique : les connaissances conceptuelles (savoir que l'addition et la soustraction sont des opérations inverses), les connaissances procédurales (savoir résoudre une addition avec retenue). Les opérations très fréquentes (surtout les additions et les multiplications) finissent par être mémorisées et leur résolution repose alors sur l'activation de séquences verbales stockées en mémoire déclarative, c'est la connaissance des faits arithmétiques. (Fayol, 2012)

1.4. Les connaissances factuelles sur les nombres

Ces connaissances peuvent être de nature encyclopédique et culturelle (par exemple, 1515 : bataille de Marignan) ou relever du domaine personnel (par exemple, 1992 : année de naissance).

1.5. Les modèles du traitement du nombre

Essentiellement, deux modèles permettent d'expliquer le fonctionnement cognitif normal du traitement des nombres (Le bel Beauchesne et al., 2009) : le modèle d'architecture fonctionnelle modulaire de McCloskey, Caramazza et Basili (1985) et le modèle modulaire du triple code de Dehaene et Cohen (2003).

Dans une perspective anatomofonctionnelle, les données recueillies en neuropsychologie depuis les années 1990 sont plus souvent compatibles avec le modèle dit du « triple code » de Dehaene et Cohen (2003). Leur modèle postule l'existence de trois types de représentations mentales indépendants, chaque représentation étant associée à des traitements particuliers et à des localisations et circuits cérébraux (Figure 1).

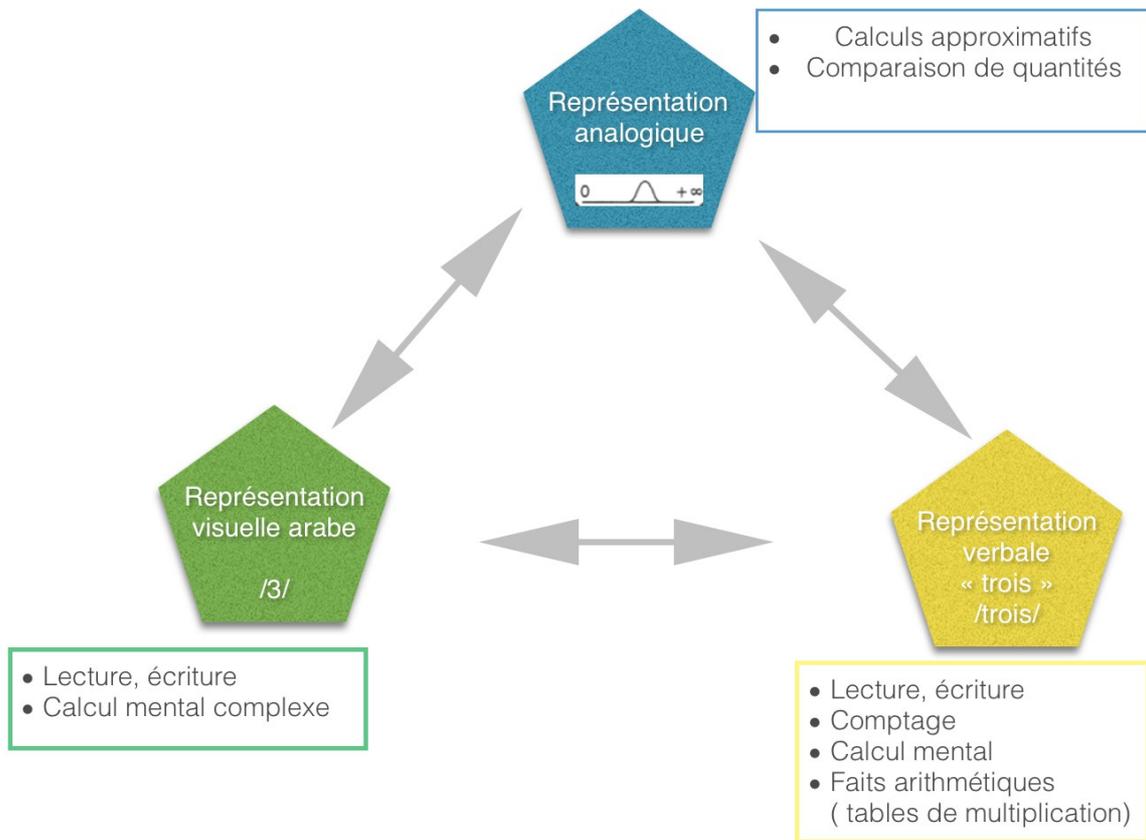


Figure 1.-Les trois représentations du nombre d'après le modèle « triple code » de Dehaene (2003)

La représentation analogique de la magnitude, indépendante de toute notation symbolique, correspond à la sémantique des nombres. Elle est assimilable métaphoriquement à une ligne graduée mentale orientée de gauche à droite et plus dense vers la droite (les grandes quantités sont plus proches les unes des autres que les petites). Cette représentation permet des calculs approximatifs et la comparaison de quantités (Fayol, 2012). Elle serait présente dans les deux hémisphères au niveau supérieur du cortex pariétal postérieur (Dehaene et al ; 2003).

La représentation auditive verbale du nombre renvoie aux formes phonologiques des quantités, mais aussi à l'écriture et la lecture des formes écrites (en lettres) des noms de nombres. Elle permettrait la formulation et la mémorisation symbolique verbale des quantités pour notamment le comptage, le calcul mental des opérations simples et elle contiendrait également les faits arithmétiques (Dehaene et al ; 2003). Elle se situerait de manière préférentielle dans l'hémisphère dominant, au niveau du gyrus angulaire dont l'activation est associée à celles d'aires périsylviennes (Dehaene et al., 2003).

La représentation visuelle arabe utilise un système logographique visuo-spatial indépendant du langage et des lettres. Elle peut être affichée et manipulée mentalement comme sur un calepin mental. Cette représentation serait mobilisée pour effectuer des calculs mentaux complexes en visualisant mentalement ces chiffres. Elle serait traitée dans les aires occipito-temporales des deux hémisphères (Dehaene et al ; 2003).

Selon Dehaene et Cohen (2003), les opérations arithmétiques requièrent donc le transcodage du nombre présenté dans un format spécifique en un format numérique adapté à la modalité de sortie.

1.6. L'effet de distance et de la taille

Se représenter mentalement et traiter des quantités numériques est associé à deux effets (Moyer et Landauer, 1967) : l'effet de la distance et l'effet de la taille de l'échantillonnage. En effet, plus deux quantités sont différentes (« éloignées »), plus elles sont plus faciles à distinguer et, pour un même rapport de différence, le temps de comparaison de deux quantités augmente avec la taille absolue des quantités (la comparaison de deux petites quantités demande moins de temps que celle de deux grandes quantités.)

Ces effets sont rapportés dans des modèles de stratégies de traitement des quantités qui se servent de la métaphore de la ligne numérique mentale et que l'on peut classer en deux catégories : les modèles « place coding » et les modèles « summation coding » (figure 2). Cette ligne numérique mentale est évoquée par Dehaene, (1997) : « Tout se passe effectivement comme si les différents nombres étaient alignés mentalement sur une ligne où chaque position correspond à une certaine quantité ». Cette ligne est orientée dans l'espace de gauche à droite, les grands nombres étant comprimés vers la droite.

Pour le traitement de « 3 » :



Figure 2. Modèles « Place coding » et « Summation coding » du traitement des nombres

Extrait de Di LucaS, Lefèvre, Pesenti (2010)

Les modèles « place coding » décrivent les quantités numériques comme des positions spécifiquement activées sur la ligne numérique, avec une propagation de l'activation aux quantités environnantes plus petites et plus grandes. (Verguts, Fias, Stevens, 2005)

Dans ce modèle, l'effet de taille de l'échantillon est expliqué par le fait de la compression des grandes quantités sur la ligne numérique mentale. Le chevauchement d'activation des autres quantités explique l'effet de distance.

Les modèles « summation coding » proposent que l'activation s'accumule sur la ligne numérique jusqu'à ce que la quantité cible soit atteinte, incluant ainsi les quantités voisines et toutes les plus petites quantités (Zorzi et Butterworth, 1999).

L'effet de distance est alors expliqué par le fait que plus deux quantités sont proches, plus leurs représentations mentales sur la ligne numérique se ressemblent. L'effet de taille résulte ici du fait que pour une différence donnée, les plus grandes quantités partagent plus d'unités que les plus petites.

Les deux types de représentation existent chez les adultes, en fonction du type de stimuli à traiter. Des études menées par Roggeman, Verguts, et Fias (2007) et Reynvoet, Brysbaert, et Fias (2002), ont conduit à la conclusion que les nombres arabes (représentations symboliques) appellent à un traitement du type « place coding » alors que le traitement de points (représentations non symboliques) tient du modèle « summation coding ».

Maintenant que nous avons expliqué le fonctionnement du nombre tel qu'il est conçu par la communauté scientifique, nous nous intéressons plus particulièrement au champ étudiant le rôle des doigts dans le traitement du nombre.

2. Les doigts comme code symbolique des quantités

Les stratégies de comptage à l'aide des doigts permettent aux enfants, par correspondance terme à terme, à développer la cardinalité et l'ordinalité (Andres, Di Luca, Pesenti, 2008). Même les adultes utiliseraient leurs doigts comme support visuel et moteur pour se représenter les nombres (Di Luca et al ; 2006).

2.1. Les configurations canoniques des doigts

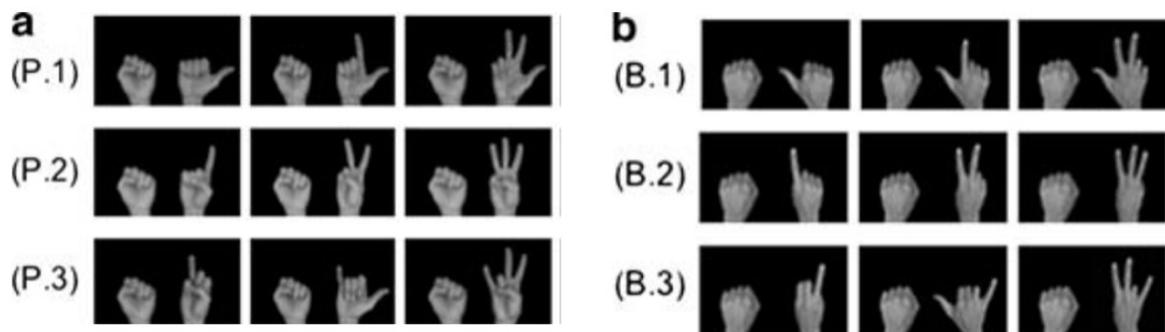
Les numérosités discrètes peuvent être représentées par des configurations de doigts. L'effet des stratégies de comptage selon ces configurations et leur possible statut sémantique ont été étudiés chez les jeunes adultes (Di Luca, Pesenti, 2008).

Dans la première expérience de cette étude, il a été démontré que les jeunes adultes dénomment les configurations numériques des doigts plus vite quand ils sont confrontés à leurs propres habitudes de configuration.

Les configurations correspondant aux habitudes de technique de comptage sont alors appelées « configurations numériques canoniques des doigts » (Figure 3).

Figure 3. Configurations canoniques (1 et 2) et non canoniques (3) de doigts en regard de la paume (P) ou du dos (B) des mains.

Extrait de Di LucaS, Pesenti (2008)



La facilitation à la dénomination grâce à cette configuration n'est pas seulement due à un effet perceptif : dans une deuxième expérience, les auteurs ont mené une expérimentation qui évaluait l'efficacité d'une amorce à une tâche de comparaison de nombres, en présentation subliminale. L'amorce numérique par une configuration de doigts permettait une comparaison plus rapide que par une amorce non numérique (une photo de deux mains hachée et brouillée). Elle était également plus efficace, en termes de rapidité et de bonnes réponses, quand l'amorce et la cible étaient congruentes et surtout, cet effet n'était observé que pour des configurations canoniques des doigts.

Enfin, ils ont exclu que seules les différences visuo-perceptives mènent à une meilleure identification et un meilleur accès sémantique pour les configurations canoniques. Les cibles « canoniques » ne sont pas mieux perçues que les cibles « non canoniques » : dans une tâche où les participants devaient attester de la présence d'une présentation canonique parmi des distracteurs non canoniques exprimant la même numérosité, le temps de détection de la cible était proportionnel au nombre de distracteurs.

2.2. Les doigts et le traitement « place coding »

Dans une étude de 2010, Di Luca, Lefèvre et Pesenti ont recherché le type de représentation et de signification sémantique associé aux configurations numériques des doigts, et la différence dans le traitement des configurations canoniques ou non canoniques des doigts. Ils ont pu conclure que les configurations canoniques donnent automatiquement accès à des représentations sémantiques alors que les configurations non canoniques requièrent une élaboration certaine pour accéder à ces représentations. Ces résultats supportent l'idée que les configurations canoniques activent un traitement « place coding » alors que les configurations non canoniques activent un traitement « summation coding ». (Roggeman et al ; 2007 ; Verguts et al ; 2005)

Cette étude soutient que les configurations canoniques des doigts ont acquis un statut sémantique, les conduisant à être traitées en « place coding » comme des stimuli symboliques, au même titre que les chiffres arabes pour les petites quantités. Elles seraient stockées dans la mémoire à long terme.

Ainsi Di Luca et ses collaborateurs concluent que les doigts seraient à inclure au triple code de Dehaene (Di Luca, Pesenti, 2011). Mais, au-delà de cette conception des doigts comme un code du nombre équivalant aux autres, ils sont partisans d'un courant de recherche qui s'intéresse à un lien des doigts beaucoup plus étroit avec le nombre : le rôle des gnosies digitales dans les compétences numériques.

3. La relation entre les compétences numériques et les gnosies digitales

Les gnosies digitales, aussi appelées reconnaissance des doigts ou localisation des doigts, reflètent la présence d'un schéma interne intact des doigts (Gerstmann, 1940).

Des recherches récentes ont remarqué des liens divers entre les gnosies digitales et les compétences mathématiques. Nous exposons les différents courants théoriques qui font état de ces liens entre les doigts et les nombres.

3.1. Hypothèse localisationniste

Cette hypothèse explique le lien entre gnosies digitales et traitement des nombres par la proximité des zones cérébrales mises en jeu pour ces compétences.

Gerstmann a réuni en un syndrome portant son nom, 4 symptômes spécifiques présents communément chez des patients : désorientation gauche droite, dysgraphie, acalculie et agnosie digitale (Gerstmann, 1924). Il a soutenu que ces symptômes avaient une localisation précise indiquant une pathologie du lobe pariétal de l'hémisphère dominant, en particulier le gyrus angulaire gauche.

Le point central du syndrome selon lui serait une perte du « sens des doigts ». Ainsi les doigts seraient impliqués dans toutes les compétences perturbées : le calcul est basé sur un système en base 10 constitué par le nombre de doigts ; les mains sont habituellement une référence pour l'orientation gauche droite ; l'écriture est possible par de bonnes praxies digitales (ce qui, selon Gerstmann, est lié à un sens conscient et individuel des doigts).

Dans la majorité des études antérieures, ce syndrome était rapporté dans des cas de lésions s'étendant au cortex pariétal gauche, et dans quelques-unes d'entre elles l'atteinte était alors appelée « le syndrome angulaire » (Rusconi E, et al ; 2010).

Une étude d'un groupe de patients dont le cortex cérébral était cartographié par stimulation focale dans le but d'enlever une tumeur (Roux et al ; 2003) a révélé que la stimulation du gyrus angulaire perturbe les performances en reconnaissance des doigts, écriture et tâches de calcul. Toutefois, d'autres zones qui provoquent agnosie

digitale et acalculie ont aussi été mises en évidence, dans le gyrus supra marginal par exemple ou près du sulcus intrapariétal. Néanmoins, les symptômes du syndrome de Gerstmann sont majoritairement retrouvés lors de lésions du lobe pariétal postérieur gauche.

En résumé, selon cette hypothèse, le lien entre les fonctions cérébrales des gnosies digitales et des tâches de calcul est dû à la proximité spatiale des projections cérébrales dans le lobe pariétal.

La conception localisationniste des fonctions cérébrales en général est actuellement plutôt modérée du fait de découvertes qui font tendre la communauté scientifique vers d'autres hypothèses.

3.2. Hypothèse de recyclage neuronal

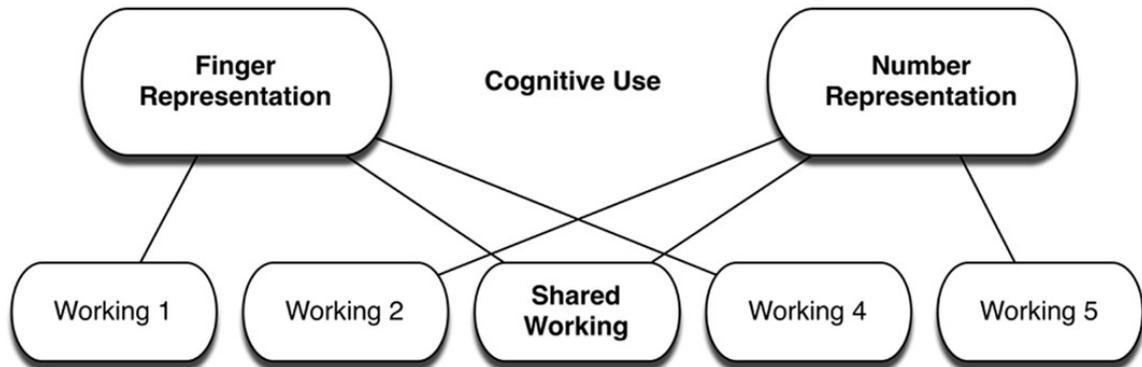
L'« hypothèse du redéploiement massif » (Massive Redeployment Hypothesis, MRH) suppose qu'un substrat neuronal dédié à une fonction peut être réutilisé pour plus tard servir à d'autres fonctions (Anderson, 2010). Selon cette théorie, il est assez commun que les circuits neuronaux établis pour un but subissent l'exaptation : ils sont exploités, recyclés puis redéployés à des fins différentes durant l'évolution ou le développement normal.

Suivant cette hypothèse, Penner-Wilger et Anderson (2013) proposent que les circuits neuronaux intégrés dans le complexe fonctionnel soutenant les gnosies digitales soient aussi le complexe fonctionnel supportant les représentations du nombre. Ainsi au cours du développement, le circuit fonctionnel originellement développé pour la représentation des doigts est redéployé afin de supporter la représentation du nombre et sert alors pour les deux utilisations.

Les auteurs expliquent alors que les gnosies digitales sont liées aux compétences mathématiques puisqu'une partie du complexe fonctionnel pour la représentation du nombre se superpose au complexe fonctionnel pour la représentation des doigts (figure 4).

Figure 4. : Les circuits neuronaux partagés par les représentations des doigts et les représentations des nombres.

Extrait de Penner-Wilger, Anderson (2013)



Ainsi, la cooccurrence, lors de lésions, d'une agnosie digitale et d'une acalculie est expliquée ici par le circuit neuronal partagé entre les deux représentations.

Dehaene et Cohen (2007) eux soutiennent l'hypothèse d'un recyclage neuronal (NRH). Selon eux, les apprentissages culturels tels que la numération reposent sur des mécanismes cérébraux anciens, qui ont évolué vers un autre usage en se reconvertissant grâce à la plasticité cérébrale. Contrairement à l'hypothèse du redéploiement massif (MRH), leur hypothèse est que les circuits seraient réutilisés pour une nouvelle fonction au détriment de la fonction initiale.

Un autre courant de neuropsychologie poursuit une hypothèse fonctionnelle, impliquant un rôle plus important des gnosies digitales, au fondement même des compétences mathématiques. Nous le développons ci-après.

3.3. Hypothèse fonctionnelle

La représentation des numérosités par le biais des doigts offre aux enfants l'opportunité d'apprendre et d'intégrer les propriétés fondamentales des nombres par des interactions sensori-motrices avec le monde.

Selon Di Luca et Pesenti (2011), la représentation des nombres par les doigts serait un moyen de contribution à l'acquisition, la construction et l'accès à la signification du nombre. En comparaison à d'autres représentations numériques, de surcroît, elle permettrait d'enraciner la sémantique des nombres grâce à des expériences sensori-motrices. Ceci est une théorie soutenue par le concept de l'« embodied cognition », la cognition incarnée à laquelle nous consacrerons un paragraphe prochain.

Les auteurs relèvent aussi que l'influence des doigts sur l'acquisition des nombres et concepts numériques est également indiquée par de nombreux faits historiques et linguistiques.

En fait, littéralement « manipuler » les nombres a probablement engendré le système en base de 10, préférentiellement à d'autres systèmes. En plus, linguistiquement il existe des liens entre le vocabulaire employé pour les doigts et pour les nombres. Par exemple en anglais « five » (5) viendrait d'une racine commune à « finger » (doigt) et « fist » (poing).

Les représentations des numérosités par les doigts auraient des propriétés sensori-motrices spécifiques conservant les propriétés numériques et permettant que les principes mathématiques soient déduits et mis à l'épreuve. Ainsi, ils représenteraient et aideraient à construire la conception du nombre, en fournissant les racines sensori-motrices sur lesquelles le concept du nombre se développe.

Des preuves chez les enfants et chez les adultes, rapportées par d'autres scientifiques soutiennent l'hypothèse fonctionnelle.

3.3.1. Le syndrome de Gerstmann développemental

Dans un article de 1963, les neuropsychologues Kinsbourne et Warrington rapportaient 7 cas d'enfants nés avec une agnosie digitale et qui présentaient tous de grandes difficultés à se représenter la plupart des concepts numériques et à résoudre de simples additions ou soustractions.

Réciproquement, Strauss et Werner en 1938 relevaient des cas d'enfants présentant des dyscalculies accompagnées de troubles perceptivo tactiles, par exemple des difficultés à reconnaître leurs doigts (cités par Fayol, 2012, 22-23).

Ainsi, le syndrome de Gerstmann a fréquemment été décrit chez des enfants présentant des troubles d'apprentissage et a été appelé syndrome de Gerstmann développemental (SGD). Le SGD est à distinguer du syndrome de Gerstmann (GS) (Suresh et Sebastian, 2000) :

- Le GS apparaît chez un individu adulte alors que le début du SGD remonte à l'enfance.
- Les étiologies des GS sont des lésions vasculaires focales ou des tumeurs alors qu'il n'y a pas de lésions identifiées dans le SGD, mais des dysfonctions focales ou des développements anormaux.
- Pour le SGD, il s'agit plutôt d'une perturbation bi-pariétale alors que pour le GS on observe des lésions dans le lobe pariétal dominant.
- Les perturbations du langage sont fréquentes chez les patients présentant un GS mais rares chez les enfants présentant un SGD.
- Les difficultés de lecture ne sont pas communes chez les patients présentant un GS mais assez communes chez les enfants présentant un SGD.
- Les problèmes de comportement ne sont pas observés chez les patients présentant un GS mais ils sont communs chez les enfants présentant un SGD.

Le syndrome de Gerstmann développemental est aussi à distinguer de la dyslexie, bien qu'il soit considéré également comme un trouble spécifique d'apprentissage :

- Les patients avec un SGD présentent la tétrade classique des signes (l'association d'une agnosie digitale, d'une acalculie, de la désorientation gauche-droite et d'une agraphie) et il y a une dissociation marquante entre les capacités de communication orale et les compétences en langage écrit au profit des capacités de communication orale.
- La dyslexie peut être familiale. Les formes de SGD sont non familiales.
- Chez les patients avec un SGD il y a une mauvaise coordination oculomotrice. Les dyslexiques présentent plutôt de pauvres compétences de balayage de texte.
- Le SGD est associé à une apraxie alors que les dyslexiques ne présentent pas d'apraxie.
- Chez les patients présentant un SGD on peut relever la présence de faibles signes neurologiques moteurs, sensoriels ou des réflexes perturbés. Des anomalies des électroencéphalogrammes sont rapportées dans 50 % des cas de SGD.
- Il y a des perturbations sévères des émotions et du comportement émotionnel chez les patients avec un SGD. Chez les dyslexiques, on relève plutôt des comportements hyperkinétiques.

Ces éléments (Suresh et Sebastian, 2000) suggèrent que le lien entre représentations digitales et représentations numériques est fonctionnel plutôt que simplement dû à la proximité spatiale des projections cérébrales dans le lobe pariétal.

D'autres preuves du lien fonctionnel des gnosies digitales et des compétences mathématiques ont été rapportées au niveau du développement de l'enfant.

3.4. Liens doigt-nombre dans le développement de l'enfant

3.4.1. Le rôle des doigts dans le système de comptage et de calcul

Dans la littérature qui porte sur la cognition numérique, il est établi que les doigts jouent un rôle fonctionnel dans le développement d'un système de comptage mature (Crollen, Seron, Noël, 2011).

En effet, les doigts sont estimés contribuer à :

- Donner une représentation iconique des nombres (Fayol, Seron, 2005).
- Garder une trace des nombres prononcés pendant que l'enfant récite la « comptine de comptage » (Fuson et al ; 1982).
- Assurer le processus de la correspondance terme à terme (Alibali et DiRusso, 1999).
- Assurer l'assimilation du principe d'ordre stable (les mots nombres doivent être engendrés dans le même ordre à chaque comptage) en accompagnant l'émergence d'une habitude d'association des doigts aux objets dans un ordre séquentiel et stable.
- Assurer la compréhension du principe cardinal (le mot nombre qui désigne le dernier élément d'une collection représente le nombre total d'éléments) en amenant les enfants à toujours utiliser le même doigt pour le même mot nombre.
- Encourager la compréhension du système numérique en base 10 (sur nos mains on représente les nombres comme une somme ou un multiple de 10)
- Permettre la réalisation d'opérations arithmétiques basiques (Ifrah, 2000).

Toutefois selon Crollen, Seron et Noël (2011), le comptage des doigts est un bon support du développement du nombre, mais il n'est pas nécessaire.

En effet, Crollen et ses collaborateurs rapportent que premièrement chez les enfants au développement normal, l'utilisation des doigts ne précède pas l'utilisation du langage. Deuxièmement, s'ils n'ont pas intégré la comptine numérique, l'utilisation de la configuration des doigts pour représenter des nombres n'est pas suffisante pour permettre le développement d'une représentation exacte des grands nombres. Troisièmement, les modèles de comptage des doigts sont culturellement inculqués,

et l'utilisation des doigts est rare quand ces modèles ne sont pas disponibles, comme chez les enfants aveugles. Enfin, les enfants qui n'utilisent pas leurs doigts pour compter et représenter les nombres ne montrent pas de développement du nombre atypique ou retardé.

Néanmoins, les doigts restent sans aucun doute un outil très pratique qui permet entre autres choses de soulager la mémoire de travail et ainsi avoir une meilleure performance dans les tâches numériques complexes.

3.4.2. Le poids de prédiction des performances perceptivo tactiles

En 1998, Fayol, Barouillet et Marinthe ont conduit une étude pour tester les hypothèses issues d'études antérieures, menées par Rourke et ses collaborateurs de 1978 à 1993.

Rourke et ses collaborateurs ont séparé des enfants de 9 à 14 ans présentant des problèmes d'apprentissage en écriture, lecture et arithmétique en trois groupes. Ils ont ainsi constaté une corrélation entre les niveaux de performance en arithmétique, en tests psychomoteurs et en tâches perceptivo tactiles chez les enfants dont le niveau en arithmétique était bien plus faible que le niveau en lecture et écriture. Ils ont établi un rapprochement entre ces résultats et le syndrome de Gerstmann. Plus tard, ils ont établi des hypothèses pour expliquer ce genre de déficience en arithmétique. Ces hypothèses peuvent être résumées ainsi : au moins en partie, à un certain âge, les déficiences dans certains champs neuropsychologiques déterminent l'aspect des difficultés en arithmétique.

Fayol, Barouillet et Marinthe (1998) ont testé les prédictions de ces hypothèses en faisant passer à 177 enfants tout-venant de 5 à 6 ans 2 tests à 8 mois d'intervalle : à 5 ans, les enfants ont passé un test pour établir leur niveau de développement intellectuel. Les 4 épreuves du test évaluent l'intégrité somato-sensorielle du cortex sensoriel. Fayol et ses collaborateurs ont aussi évalué leurs compétences en dessin et leur niveau arithmétique (écriture de chiffres, dénombrement des collections, résolution de problèmes simples). Un an plus tard, ces mêmes enfants ont eu à compléter une autre série d'épreuves arithmétiques (dictée de nombres et résolution de problèmes).

Leur étude a montré la même corrélation entre le niveau en arithmétique et celui en test neuropsychologique chez des enfants de 5 à 6 ans que chez les enfants de 9 à 14 ans, testés par Rourke et ses collaborateurs.

Leur étude longitudinale a aussi permis à Fayol et ses collaborateurs d'observer que le score perceptivo tactile recueilli à 5 ans prédit mieux que le développement intellectuel, les performances arithmétiques évaluées à 5 et 6 ans.

En 2005, Noël s'est appuyée sur ces résultats pour une étude dont l'objectif était de tester la spécificité de la prédiction des performances arithmétiques des compétences neuropsychologiques des enfants entre 5 et 7 ans, pour contribuer à mieux comprendre cet effet.

Au début du CP, 41 enfants ont été testés sur leurs gnosies digitales, l'orientation droite-gauche et leur développement global. Quinze mois plus tard, on a évalué leurs compétences de lecture et leurs performances numériques. L'analyse des résultats indique que les gnosies digitales (discrimination et reconnaissance) prédisent mieux les performances arithmétiques que le niveau de développement, et ce de manière spécifique puisqu'elles n'influencent pas les performances en lecture.

De plus, les habiletés perceptivo tactiles ne permettent pas de prédire uniquement les performances numériques qui dépendent directement des représentations digitales (additions, identification de représentations digitales). Elles prédisent aussi la performance pour des tâches qui reposent sur la représentation des quantités.

Cette étude a également montré qu'entre 5 et 7 ans, l'enfant a construit mentalement les représentations digitales qui lui servent à nommer les nombres.

Les résultats de ces 2 études confirment la liaison existant entre habiletés perceptivo tactiles et capacités de représentation et de manipulation des quantités, indépendamment du niveau de développement.

3.4.3. Entraîner à la différenciation des doigts pour améliorer les compétences mathématiques

Gracia-Bafalluy et Noël (2008) ont fait l'hypothèse qu'entraîner les enfants à la différenciation de leurs doigts en termes de sensibilité et mobilité pourrait améliorer les gnosies digitales et pourrait, en plus, améliorer les performances numériques.

Ainsi, 47 enfants de CP ont été sélectionnés et divisés en trois groupes : des deux groupes d'enfants avec de mauvaises gnosies digitales, un a suivi un entraînement spécifique et l'autre moitié du groupe, en contrôle, a suivi un entraînement non spécifique. Enfin, un troisième groupe avec de bonnes gnosies digitales n'a pas suivi d'entraînement.

L'entraînement spécifique de différenciation des doigts consistait en deux séances d'une demi-heure par semaine, pendant huit semaines. Les activités développées reposaient sur un système d'association des doigts à une couleur, les enfants faisaient des jeux de labyrinthe, de pianotage et de pointage.

Après entraînement, par rapport au groupe contrôle, ce groupe montrait de bien meilleures performances en gnosies digitales, en représentation des nombres avec les doigts et en tâche de quantification. Ils présentaient aussi un meilleur traitement des chiffres arabes.

Les auteurs montraient ainsi qu'améliorer les gnosies digitales chez les enfants est possible et qu'un tel entraînement fournit un support utile pour apprendre les mathématiques.

Cependant, les résultats de cette étude ont été critiqués et discrédités d'un point de vue statistique par Fischer. Il s'est saisi de cet article pour en faire un exemple du phénomène de « régression vers la moyenne » (Fischer, 2010).

3.4.4. Les représentations des doigts dans le calcul mental chez les enfants

Notre anatomie fait que le système des nombres représenté par les doigts comprend un fossé entre les deux mains, formant ainsi des « chunks » de 5 (Domahs et al ; 2008).

Au cours du développement des habiletés numériques, après une phase initiale au cours de laquelle les enfants comptent leurs doigts un par un afin d'en déterminer le nombre, ils commencent à reconnaître des configurations de doigts. Les représentations de nombres plus grands que cinq contiennent alors une main complète, c'est-à-dire que les enfants décomposent ces nombres en « 5 + x ». Les calculs pour lesquels la somme des chiffres est inférieure ou égale à 10 sont alors simples. Même quand les sommes à calculer sont supérieures à 10, une technique simple consiste à réutiliser une des deux mains pour représenter les dizaines.

Quand la somme est supérieure à 15, cela implique la réutilisation d'une main : il faut alors retenir mentalement les nombres qui s'additionnent au fur et à mesure. Des erreurs spécifiques peuvent apparaître à ce stade, quand les enfants perdent le décompte des nombres représentés sur une main entière. Ainsi les résultats de calculs sont déviés de 5 ou parfois de multiples de 5.

Cependant, les stratégies de calcul sur les doigts doivent être abandonnées ou drastiquement modifiées (perdant la correspondance terme à terme) quand les calculs à réaliser se font plus complexes. Durant cette phase de transition, certains des enfants utilisent toujours les représentations du nombre sur leurs doigts, même si cette technique devient de plus en plus inadéquate.

Dans leur étude, Domahs, Krinzinger et Willmes (2008) ont montré des traces de ces stratégies externes qui influenceraient toujours le calcul même quand le comptage des doigts n'est plus expressément utilisé. L'étude a été menée auprès de 137 enfants de 7 à 8 ans de différentes écoles allemandes de milieu socio-économique moyen. Les enfants ont été testés à 4 moments durant un an et demi par des épreuves de calcul. Il s'agissait de problèmes d'additions simples présentés

sur papier. Leurs réponses devaient être données à l'oral le plus rapidement possible. Des erreurs de déviation de 5 ont été relevées chez 42,3 % des enfants au premier test. Comme leur étude était longitudinale, les auteurs ont remarqué que cette erreur apparaissait temporairement dans le développement de l'enfant. En fait, la proportion d'enfants dont on a relevé les erreurs lors des tests ne révélerait pas la vraie proportion, plus importante, d'enfants qui commettraient cette erreur à un moment de leur scolarité.

Ces résultats permettent de conclure que les représentations mentales des nombres peuvent, au moins temporairement, hériter des caractéristiques de représentations externes par les doigts.

Des études utilisant des techniques d'imagerie cérébrale fonctionnelle chez des enfants dyscalculiques ont en effet rapporté que les représentations primaires des nombres sont stockées dans des aires dédiées à la représentation des doigts (Kaufmann et al ; 2008).

Nous avons exposé par ces multiples études le lien fonctionnel qui existerait entre les doigts et les nombres du point de vue développemental, chez l'enfant. Mais qu'en est-il à l'âge adulte ?

3.5. L'influence des représentations des doigts chez les adultes

Des études récentes chez les adultes montrent que le comptage des doigts forme le traitement du nombre et du calcul toute la vie et que les représentations des nombres par les doigts ne disparaissent pas quand les représentations symboliques se développent. Au contraire, leur impact est toujours observé chez les adultes (Badets, Pesenti, Olivier, 2010).

Dans cette étude, les participants doivent fournir une réponse orale à une addition simple, ce qui déclenche une proposition de résultat correct ou non, sous forme de bâtonnets ou de représentation canonique de doigts.

Les réponses sont plus rapides avec les représentations canoniques de doigts, mais uniquement quand elles montrent la bonne réponse.

Ainsi chez les adultes, les simples opérations mathématiques sont toujours inconsciemment étayées par les représentations du nombre par les doigts, comme pour rappeler le développement du nombre chez l'enfant. Nous abordons ensuite une autre preuve de ce lien, dans le contexte théorique des cognitions incarnées.

3.5.1. Le rôle des doigts dans les associations spationumériques, preuve de l'« embodied cognition ».

Il existe une association naturelle entre nombres et espace (Fischer, Brugger, 2011). Plus de 100 expériences ont étudié notre tendance à associer les petits nombres (1 ou 2) avec l'hémiespace gauche et les grands nombres (8 ou 9) avec l'hémiespace droit, le plus souvent avec des tâches de jugement de parité ou de grandeur. Cet effet est appelé l'effet SNARC (Spatial Numerical Association of Response Code).

Malgré le grand nombre de preuves de l'effet SNARC, il n'y a pas de consensus quant à son origine. Un premier courant théorique propose qu'il émerge de nos habitudes de lecture (Dehaene, Bossini, Giraux, 1993).

Fischer et Brugger (2011), dans leur article soutiennent qu'elles apportent seulement une contribution minimale :

Premièrement, selon les cultures, il n'y a pas de sens de lecture unique. Par exemple, les lecteurs hébreux lisent les textes de droite à gauche, mais les nombres de gauche à droite, d'ailleurs l'absence d'effet SNARC horizontal a été démontrée dans cette population (Shaki et al ; 2009). En fait, pour cette population ou les populations bilingues (par exemple pour des lecteurs bilingues Anglais-Chinois ; Hung et al ; 2008) il existe plusieurs effets SNARC selon le contexte qui leur est présenté.

Deuxièmement, l'effet SNARC n'est pas construit selon les années d'exposition à une habitude de lecture : des bilingues Russes-Hébreux modifient leur sens de lecture après quelques minutes de lecture d'un texte cyrillique ou hébreu (Shaki et Fischer, 2008). Ainsi, les habitudes de sens de lecture n'ont qu'un effet ténue.

Troisièmement, il a été observé que les enfants de 4-5 ans (non lecteurs) sont déjà plus efficaces pour l'exploration d'objets lorsque ceux-ci sont numérotés dans un ordre croissant de gauche à droite (Opfer et Furlong, 2011).

Enfin, les effets SNARC peuvent naître dans un contexte d'absence de lecture. Gullledge (2006) a comparé les performances d'étudiants à celles de singes pour une tâche de classification selon un ordre de grandeur. La latence des réponses a montré un SNARC horizontal pour les deux groupes.

Dans leur article (Fischer, Brugger, 2011), les auteurs exposent les preuves qui étayent la théorie d'une origine alternative de l'effet SNARC : le comptage sur les doigts.

En effet, des études récentes ont établi le lien entre les mouvements des doigts et la production des nombres avec un effet de congruence entre l'amplitude de l'ouverture des doigts et la grandeur des nombres. Dans cette étude de Andres et al. (2008), les participants devaient produire au hasard des nombres après l'observation sur un écran d'une action représentant soit la fermeture ou l'ouverture des doigts, ou un changement de couleur utilisé comme condition de contrôle. L'observation de la fermeture des doigts conduit les participants à produire des petits nombres, alors que l'observation d'une ouverture des doigts les a plutôt amenés à produire des grands nombres .

Plusieurs observations ont aussi montré que l'effet SNARC est retrouvé au niveau des doigts : dans une expérience menée par Samuel Di Luca et al. (2006), pour une tâche de désignation de chiffres arabes par pression sur une touche, étant donné 1 touche et 1 chiffre par doigt, la performance des participants est meilleure quand l'agencement des touches respecte leur stratégie prototypique de comptage des doigts.

L'association doigt-chiffre n'est pas relative à la main à laquelle ils sont reliés, mais plutôt à leur position dans l'espace : dans une expérience de 2011, Plaisier et Smets ont demandé à des participants de se tenir dans une position avec les bras étendus, mains croisées devant eux : il fallait qu'ils pianotent aléatoirement leurs

doigts tout en dénommant des nombres entre 1 et 30 dans un ordre aléatoire. Ils énonçaient de plus petits nombres quand la nouvelle « touche » était à gauche de la précédente, peu importe si leurs mains étaient alignées ou croisées, donc à gauche dans l'espace.

Cette étude participe aussi à montrer à quel point le cadre de référence des associations doigt-nombre est flexible.

Suite à ces études des comportements par des méthodes non invasives, nous finirons notre exposé en décrivant les études qui ont été menées à l'aide des techniques de neurologie.

3.5.2. Preuves neuroscientifiques de l'association doigt-nombre

Dans cette étude de 2005, Rusconi, Walsh et Butterworth ont demandé aux participants 4 différentes tâches : 2 des tâches impliquaient les doigts (réponse tactile à un stimulus), les deux autres impliquaient les nombres (association de chiffres). Pendant ces tâches, les examinateurs provoquaient une perturbation par une stimulation magnétique transcrâniale à répétition (rTMS) sur le lobe pariétal postérieur des deux hémisphères.

La stimulation du gyrus angulaire gauche perturbait les tâches demandant accès aux représentations des doigts et au traitement des nombres. Ainsi cette étude montre la relation entre les nombres et les représentations des doigts chez des adultes qui ne les utilisent plus pour résoudre des tâches numériques.

Dans une étude de 2006, Tang et al. ont démontré par IRM fonctionnelle une différence corticale de la représentation du nombre chez des Chinois et des anglophones.

Les tâches numériques activent le cortex moteur chez les Chinois, mais pas chez les Occidentaux. En fait, dans la culture asiatique, les enfants apprennent les mathématiques à l'aide de bouliers ou abaqués. Ils constituent des systèmes analogiques de codage associant des représentations et des procédures de manipulation. Ainsi, l'étude montrerait que les Chinois ont « incorporé » (embodied) la représentation de faits arithmétiques.

Dans cette étude de 2007, Sato et al. cherchent à étudier le lien neuronal entre le nombre et les doigts chez les adultes. Ils ont utilisé la stimulation magnétique transcrânienne pour étudier les variations d'excitabilité des muscles de la main pour des individus réalisant des tâches visuelles de jugement de parité. Cette tâche ne demande pas de compter et porte sur des chiffres arabes de 1 à 9.

Les résultats de leurs observations soulignent une relation proche entre les nombres et la représentation corticale des doigts, en montrant une augmentation spécifique de l'excitabilité cortico-spinale des muscles de la main droite. Cette augmentation était spécifique pour les petits nombres de 1 à 4. Leur opinion est que ce résultat pourrait refléter la trace des stratégies de « finger embodiment » développées durant l'enfance et utilisées pour représenter et manipuler les nombres. Cette élaboration de la représentation du nombre par les doigts, soumise à notre expérience corporelle et inscrite dans le système sensori-moteur pourrait être automatiquement rappelée durant le traitement des nombres.

4. Buts et hypothèses

Les études menées par les équipes de Fayol, Barouillet, Marinthe (1998) et Noël (2005) qui testent le poids de prédiction des performances perceptivo tactiles chez les enfants sont sous-tendues par un objectif pédagogique. Gracia-Bafalluy et Noël (2008) ont même tenté de faire une application directe de ces résultats en soumettant des enfants à un entraînement de différenciation de leurs doigts pour améliorer leurs compétences mathématiques. Malheureusement, leur expérience a été un échec du point de vue statistique.

En fait, dans la littérature sur les cognitions mathématiques, on ne trouve que les 2 articles précédemment cités (Fayol et al ; 1998 ; Noël et al ; 2005) comme faisant état d'une corrélation entre les compétences en arithmétique et les gnosies digitales. Donc, même si les doigts semblent jouer un rôle fonctionnel dans le développement d'un système de comptage mature (Crollen , Seron, Noël, 2011), la question n'est pas claire sur le rapport des gnosies digitales et des compétences mathématiques au-delà de la proximité de leurs projections cérébrales dans le lobe pariétal (Dehaene et Cohen, 2003).

Il paraît donc nécessaire d'apporter plus de matériel à l'étude de l'importance de la représentation des doigts dans la maîtrise de l'arithmétique. Est-ce que les doigts sont un support cohérent de l'apprentissage de l'arithmétique ? Sont-ils toujours un outil privilégié à l'âge adulte ?

Pour répondre à ces problématiques, un protocole expérimental a été établi, dans lequel ont été incluses des épreuves qui vérifient le niveau des gnosies digitales et des compétences mathématiques des sujets et un test informatique a été créé pour expérimenter l'efficacité des doigts comme outil arithmétique. Le test informatique oppose des doigts à des pions.

Cette étude est un prétest du protocole puisqu'il est destiné à une étude à mener auprès d'enfants dans un objectif pédagogique. Afin de valider ce protocole sans qu'il soit biaisé par des difficultés d'attention, nos sujets sont de jeunes adultes. Nous nous attendons, en regard de la littérature à ce que :

- (1) Les sujets performants pour le test d'arithmétique et bons en gnosies digitales soient performants au test informatique.
- (2) Les sujets présentent une meilleure performance pour les épreuves avec les doigts que pour les épreuves avec les pions.

Nous considérons ici les doigts comme un outil des cognitions incarnées (Fischer et Brugger, 2011). C'est le courant théorique dans lequel nous nous inscrivons.

Sujets, matériel et méthode

Pour cette étude, nous avons administré un protocole de test à une vingtaine de jeunes adultes. L'intérêt du choix des jeunes adultes était d'avoir des sujets dont les capacités d'attention seraient à leur maximum pour ne pas biaiser les résultats. En effet, le protocole de test était plutôt long et demandait une grande concentration.

Il s'agissait d'évaluer le niveau en gnosies digitales et leurs capacités arithmétiques avant d'observer les performances au test informatique censé tester l'efficacité des doigts comme support numérique par rapport à des pions.

Afin d'observer la cohérence entre le niveau en mathématiques et la maîtrise des doigts, on a cherché à inclure des participants aux profils variés. Les participants ont été recrutés parmi un cercle personnel d'amis français, étudiants et jeunes travailleurs (de Lille, Nantes et Cluj-Napoca).

Parmi eux, on compte 7 étudiants en école vétérinaire et 2 étudiants en école de médecine, 3 étudiants en école d'ingénieur et 5 étudiantes en orthophonie, 1 étudiant en psychologie, une étudiante en arts appliqués, et 1 baccalauréat professionnel.

1. Sujets

1.1. Critères d'inclusion

Les participants devaient être âgés de 18 à 30 ans et avoir une bonne vision.

1.2. Critères d'exclusion

Le participant ne devait pas rapporter d'histoire de pathologie du développement ou de trouble neurologique.

Le but de notre recrutement était de pouvoir observer une cohérence entre le niveau en mathématique et les performances au protocole du test. Les profils mathématiques ont été équitablement attribués en fonction du score des sujets à l'épreuve arithmétique. Ainsi nous avons analysé des résultats au protocole de test en confrontant le groupe des « bons » c'est-à-dire les 10 meilleurs au test arithmétique au groupe des « faibles » c'est-à-dire les 10 autres.

Nous rendons compte de la répartition de l'échantillon en «bons» ou «faibles» en mathématiques dans le tableau 1.

Tableau 1 : Répartition des sujets en âge, sexe et profil mathématique

	Effectif	Age (moyenne)	Sexe	
			Femmes	Hommes
Groupe « bons »	10	22,9	7	3
Groupe « faibles »	10	22,1	6	4
Total	20	22,5	13	7

2. Matériel

Le protocole de test comprend 4 sous-parties : des tests de gnosies digitales, un questionnaire de latéralité, un protocole de test des habiletés arithmétiques et le test informatique. Le temps de passation de ces 4 parties est d'environ 2 h par sujet.

Pour chaque participant, nous avons constitué un feuillet comprenant le formulaire de consentement de participation (qui figure dans les annexes de ce mémoire), des renseignements concernant le sujet, le questionnaire de latéralité (Oldfield, 1971), le support des tests des gnosies digitales et le protocole Shalev d'évaluation des compétences arithmétiques (Rubinsten et Henik, 2005). Enfin, nous lui avons attribué un numéro d'anonymat qui a servi de référence pour le test informatique.

Le test informatique est passé en deux fois 30 minutes. Entre les deux sessions, on a intercalé des épreuves testant les gnosies et la latéralité d'une part et le protocole Shalev d'évaluation des compétences mathématiques d'autre part. Il s'agit de ménager les capacités d'attention du sujet (sans le décourager par un temps de passation trop long).

2.1. Le questionnaire de latéralité manuelle.

Il s'agit de l'« Edinburgh Handedness Inventory » de R. C Oldfield datant de 1971. Il a été constitué afin d'évaluer quantitativement et par une application simple la fréquence manuelle. Après un tri et une sélection d'items selon des facteurs culturels et socio-économiques, il a été testé et validé à l'époque sur un échantillon de 1100 jeunes adultes.

Il comporte 10 questions sur l'habitude d'utilisation la main droite ou de la main gauche au quotidien, 1 question sur l'habitude d'utilisation du pied et 1 question sur l'habitude d'utilisation de l'œil.

Il leur faut indiquer quelle main ils utilisent de préférence pour :

- Ecrire
- Dessiner
- Lancer un objet
- Découper avec une paire de ciseaux
- Se brosser les dents
- Utiliser un couteau sans fourchette
- Tenir une cuillère
- Balayer (la main supérieure sur le balai)
- Allumer une allumette (la main qui tient l'allumette)
- Ouvrir le couvercle d'une boîte (la main qui tient le couvercle)

- Le pied préféré pour taper dans un ballon
- L'œil préféré pour viser

Les préférences sont indiquées par « + » ou « +++ » dans l'une ou l'autre des colonnes désignant le côté droit ou le côté gauche. Les préférences ne sont pas nécessairement exclusives.

Les préférences sont cotées de 0,5 à 1 pour le côté droit et - 0,5 à -1 pour le côté gauche. La formule du calcul $(D-G)/(D+G)$ aboutit à un score de latéralité manuelle.

2.2. Les tests des gnosies digitales.

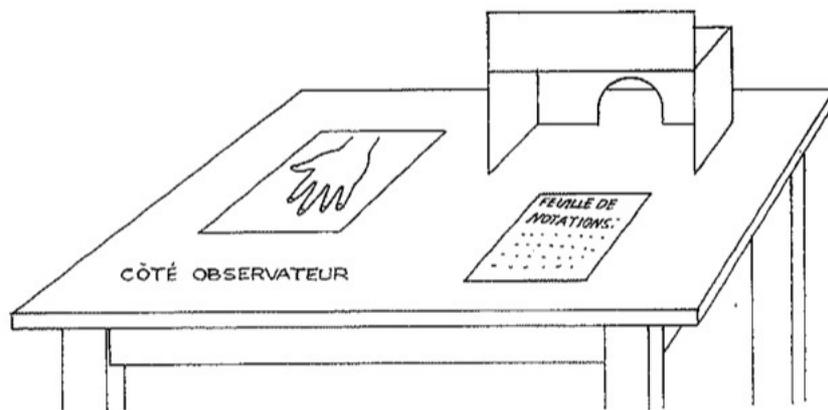
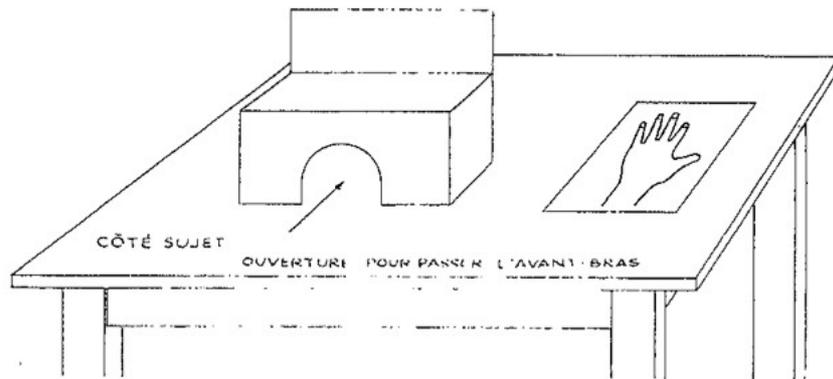
Les gnosies digitales étaient testées par 2 épreuves.

La première est le test des gnosies digitales de Nadine Galifret-Granjon (1964) créé à la demande du Dr Ajuriaguerra dans le but de posséder une échelle permettant de comparer les résultats de la clinique à ceux d'une population normale. C'est le test le plus communément utilisé et reconnu quand il s'agit de tester les gnosies digitales des enfants et adultes, c'est pourquoi il a été inclus dans notre protocole.

C'est un test inspiré du test original de Benton, Hutcheon et Seymour (1951) et utilisé par son auteure pour des enfants de 6 à 14 ans. Les résultats de son étude dans une population normale se sont d'ailleurs révélés très dispersés, quoiqu'évoluant avec l'âge, suggérant que les gnosies digitales relèveraient d'une « aptitude » particulière.

Dans ce test, on commence par demander au patient de tracer sur une feuille blanche le contour de ses propres mains (la droite puis la gauche) en numérotant ses doigts de 1 à 5 en commençant par le pouce. La consigne est de dénommer, à l'aide du dessin de sa main et par leur numéro, les doigts activés par une simple stimulation tactile de l'examineur. Le sujet ne peut toutefois pas voir sa main stimulée, celle-ci est dissimulée dans une boîte. On rend compte des conditions de passation de ce test dans la figure 6.

F6:Schéma des conditions de passation du test des gnosies digitales de Galifret-Granjont



Il y a 3 modalités de stimuli :

- une touche unique
- deux touches successives
- deux touches simultanées.

Il y avait 10 stimuli par modalités, pour la main droite puis pour la main gauche.
6 scores étaient donc établis.

Le test original préconisait de faire passer deux fois ce protocole : une fois, le dessin de la main était homologue à la main stimulée, la seconde fois, la main stimulée était symétrique au dessin de la main. Dans notre passation, nous n'avons fait que la partie avec le dessin homologue.

Le deuxième test des gnosies digitales est un test plus complexe que nous avons élaboré, le « Inbetween test ».

Cette fois, l'examineur touche deux doigts du sujet dont la main est posée à plat paume contre la table. La consigne est de dire une estimation du nombre de doigts entre les deux doigts stimulés. Après quelques exemples les yeux ouverts, l'épreuve se déroule pour le sujet les yeux fermés.

Il y a 30 stimuli pour la main droite puis 30 autres pour la main gauche. On obtient deux scores notés sur 30.

2.3. Le test des compétences arithmétiques

Le protocole « Shalev » est un test utilisé par Rubinsten et Henik dans une étude de 2005 sur une population d'adultes. Il a été adapté à partir d'une batterie originale de 1993 de l'équipe de Ruth Shalev, créée afin de tester les connaissances basiques sur le nombre chez des enfants. Elle est inspirée du modèle de Mc Closkey et al. (1985).

Il évalue les connaissances factuelles sur le nombre, les compétences arithmétiques complexes, les compétences de calcul des nombres décimaux et les compétences de calcul sur des opérations avec des fractions.

Il comporte :

- connaissances factuelles sur le nombre :
 - 5 additions
 - 5 soustractions
 - 5 multiplications
 - 5 divisions

- compétences arithmétiques complexes
 - 8 additions
 - 8 soustractions
 - 8 multiplications
 - 8 divisions
- compétences de calcul des nombres décimaux
 - 4 additions
 - 4 soustractions
- opérations avec des fractions
 - 5 additions
 - 5 soustractions
 - 5 multiplications
 - 5 divisions

Le feuillet de passation du protocole de test du sujet comprenait ainsi 7 pages de calcul. Il était demandé au sujet d'effectuer les calculs au maximum de ses possibilités, sans qu'on lui rappelle les procédures des opérations. Pour chaque page, le sujet était chronométré, il lui était possible de faire de petites pauses si le protocole lui était trop pénible. L'épreuve durait en tout au maximum 20 minutes. On pouvait récolter 7 scores et 7 temps de passation.

2.4. Le test informatique

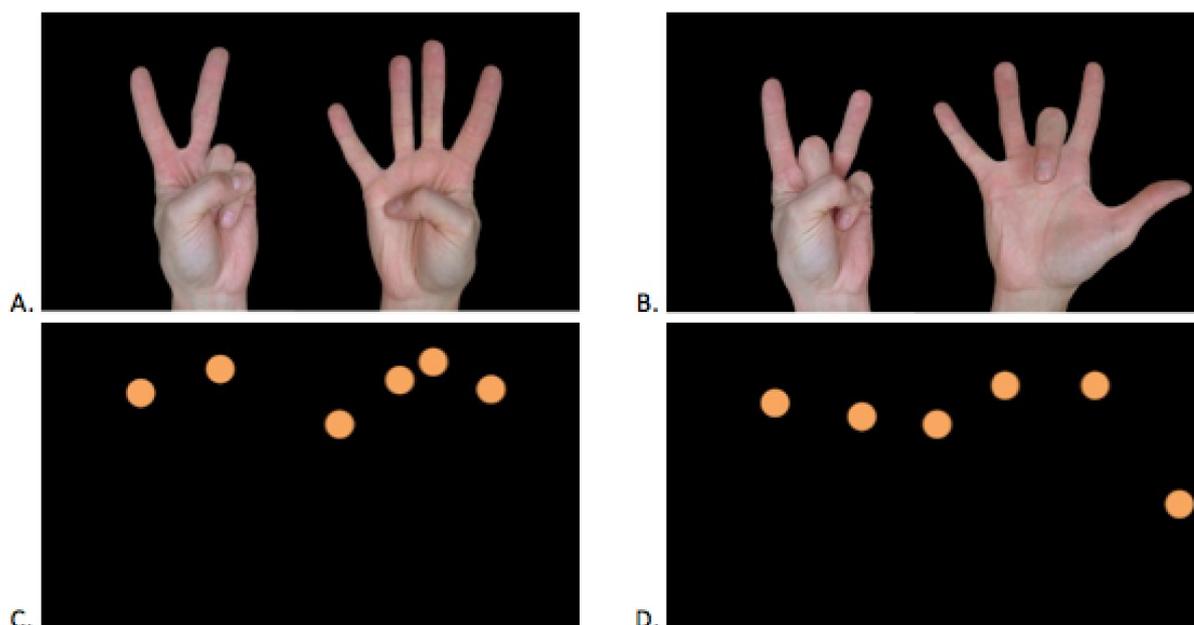
C'est l'épreuve principale de notre protocole de test. La tâche consiste en une tâche de comptage : les sujets doivent donner une réponse orale en résultat à des situations de petites additions : on présente au sujet sur la même diapositive deux représentations non symboliques de 1 à 5. Chaque réponse attendue par l'addition de ces deux représentations est un nombre de 2 à 7.

La première condition à laquelle sont exposés les sujets est la condition doigts : on présente au sujet différentes configurations de doigts. Deux exemples des deux types de configurations de doigts sont présentés dans la figure 7 (A et B). Ainsi la

condition doigt est présentée soit en configuration canonique (figure 7 A) soit en configuration non canonique (figure 7 B). Cette variable est une variable aléatoire puisque les deux types de configurations sont distribués aléatoirement et équitablement parmi les stimuli présentés au sujet.

On oppose à la condition doigts la condition contrôle pions : dans cette condition on présente au sujet des pions qui sont repartis selon les positions des apex des doigts (figure 7, C et D). De cette façon, les dispositions de pions suivent aléatoirement deux types de configurations qu'on a appelées congruentes (figure 7 C) ou non congruentes (figure 7 D). Dans cette condition, les sujets ne devraient pas voir de différence entre les configurations congruentes et non congruentes (contrairement à la distinction qu'ils pourraient faire dans la condition doigts, pour les configurations canoniques et non canoniques). Les configurations canoniques de pions existent, mais elles correspondent aux dispositions classiques de pions sur des dés par exemple, ce n'est pas ce qui est utilisé ici.

Figure 7 : Diapositives présentées aux sujets lors du test informatique: La condition doigts en configuration canonique (image A), la condition doigts en configuration non canonique (image B), la condition pions en configuration congruente (C) et la condition pions en configuration non congruente (D).



On a appliqué 2 variables fixes aux conditions doigts et pions : la position de mains du sujet et la position de l'écran sur lequel sont présentées les diapositives.

En effet pour observer le rôle de la position des mains dans cette tâche, on a introduit une condition main sur les genoux. Le sujet est assis sur une chaise, il pose ses mains ouvertes sur ses genoux avec les paumes vers le haut. Ainsi elles sont sous la table, en regard de l'écran de l'ordinateur posé sur la table. Une photo de cette disposition est proposée par la figure 8 A.

On a voulu reproduire ici un effet reconnu et observé dans l'expérience du Rubber hand effect (1998). C'est une expérience menée auprès de passants adultes sur une plage des États-Unis. Le sujet est assis à une table séparée en deux par un écran vertical. Il place ses bras de chaque côté de l'écran qui est assez grand pour que le sujet ne puisse pas voir son bras gauche. On place une main synthétique dans l'hémiespace droit. Elle est alignée à l'épaule gauche et elle y est reliée par un drap blanc qui donne visuellement l'effet d'un bras. L'expérimentateur caresse un à un, avec un pinceau, les doigts de la vraie main gauche du sujet (que le sujet ne peut pas voir) et simultanément, il caresse avec le même type de pinceau les doigts correspondants sur la main en plastique (que le sujet regarde). Sans s'en rendre compte, le sujet rapproche son bras gauche contre l'écran vertical et, quand l'expérimentateur ne caresse plus que les doigts de la main en plastique, le sujet pense que ses vrais doigts sont aussi stimulés. Soudainement, l'expérimentateur dégage un marteau et écrase brusquement la main en plastique. Le sujet est effrayé et par réflexe dégage son bras gauche. Tout le monde rit de constater l'illusion qui a piégé le cerveau du sujet à croire que la main en plastique était la sienne, uniquement par un effet visuel. Ce sont les neurones miroirs qui seraient en jeu dans le Rubber Hand effect. On a voulu utiliser le même principe pour que, dans notre protocole, les sujets s'approprient les mains présentées à l'écran.

En opposition à cette condition est la condition mains dans le dos : le sujet assis a les mains croisées dans le dos, avec les poignets qui se touchent et ses doigts ne touchent pas le dossier de sa chaise (figure 8 B).

Figure 8 : Représentation des conditions mains sur les genoux (image A) et mains dans le dos (image B).



Pour observer le rôle de l'espace dans notre épreuve, la position de l'écran de l'ordinateur sur lequel sont présentées les diapositives induit la condition espace proche, opposée à la condition espace lointain. En espace proche, l'écran est positionné le plus près possible du sujet, de sorte que quand ses mains sont sur ses genoux, l'écran soit juste au-dessus des mains. En espace lointain, l'écran est placé à 150 % de la longueur du bras du sujet.

Pour ce test informatique, le sujet est assis sur une chaise à une table devant un écran d'ordinateur portable et le testeur est à proximité pour relever les réponses orales du sujet. Le sujet énonce ses réponses dans un microphone qui est fixé par un pied à la hauteur de sa bouche. Ce microphone est relié à un boîtier lui-même relié à l'ordinateur. Les diapositives qui présentent les conditions doigts ou pions sont programmées pour être exposées au maximum pendant 3 secondes.

Un boîtier informatique est la clé vocale qui permet au sujet d'imposer son rythme pendant l'épreuve. En effet, dès qu'il énonce une réponse, la diapositive passe à la suivante. Ainsi, en général, une diapositive est passée en moins de 3 secondes. La clé vocale enregistre aussi automatiquement le temps de réponse pour chaque stimulus.

Il y a 96 stimuli pour que chaque diapositive soit aléatoirement présentée deux fois et que les conditions canoniques et non canoniques ou congruentes et non congruentes soient toutes représentées. Une passation de test pour une condition doigts ou pions dure environ 5 minutes.

En appliquant les deux variables bloquées de la position des mains et de la position de l'écran, il y a donc 4 passations de ce test pour la condition doigts puis 4 autres passations pour la condition pions. Ainsi la passation d'une seule condition prend un peu moins de 30 minutes. Au total le sujet est soumis à 8 passations de 5 minutes chacune.

Nous avons imposé une coupure entre la passation du test pour la condition doigts et la passation du test pour la condition pions, et les avons intercalées avec une épreuve « papier-crayon » du test arithmétique, du questionnaire de latéralité ou du test des gnosies digitales.

Pour cette tâche informatique, le testeur relève manuellement en une liste les réponses du sujet. Ces réponses sont comparées post-test à un fichier informatique qui a généré les bonnes réponses pour chacune des 8 passations et qui a enregistré le temps de réponse du sujet pour chaque stimulus.

L'exploitation du taux de bonnes réponses par sujet par passation ne s'est pas révélée intéressante. C'est à partir des moyennes des temps de réponse, relevées uniquement pour les bonnes réponses, qu'on a estimé la performance des sujets pour chaque passation du test informatique.

Résultats

Nous avons fait passer notre protocole de test à 20 jeunes adultes. Cette population a été répartie en deux groupes en fonction de leurs résultats au test arithmétique Shalev : les « bons » et les « faibles » en mathématiques. Nous avons observé leurs scores aux tests de gnosies digitales et nous avons relevé leurs performances au test informatique qui est l'épreuve principale de notre protocole, en termes de moyennes de temps de réponse. Chaque sujet a donc 8 notes de performances, 4 pour chaque condition doigts et pions.

Dans cette partie, nous exposons les performances des sujets pour le test arithmétique, le test de gnosies digitales et pour les différentes conditions du test informatique et nous les confrontons selon des hypothèses qu'on a émises. Pour nous permettre d'analyser les résultats récoltés, nous avons émis 2 hypothèses concernant les performances générales au protocole de test et 5 hypothèses concernant la partie expérimentale informatique qui est le point focal de notre étude.

1. Analyses générales

Avant de resserrer notre analyse sur le protocole expérimental informatique, nous avons fait des appréciations générales sur les résultats de protocole de test entier.

1.1. Performances arithmétiques versus gnosies digitales

On a voulu observer ce qui est apporté par la littérature : les sujets qui sont performants en arithmétique ont de bonnes gnosies digitales. L'analyse de corrélation de Pearson (r) permet d'observer une tendance entre les gnosies mesurées par le test Galifret-Granjon et le score global au test arithmétique, mais seulement chez les adultes les moins performants en mathématiques ($r = .619$; $p = .076$; figure 7 A et B, faibles et bons en mathématiques, respectivement). Nous n'avons sélectionné que les résultats obtenus au test de Galifret-Granjon puisque les résultats au Inbetween test ne sont pas significatifs.

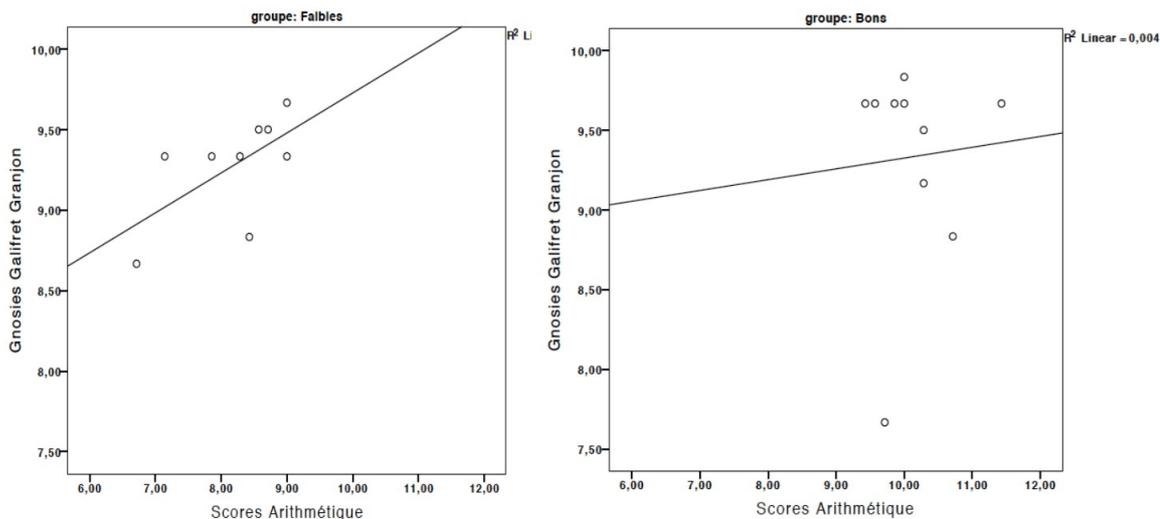


Figure 7 : Performances au test Galifret Granjon et au test arithmétique pour les sujets faibles et bons en mathématiques (panel A et B, respectivement)

Ainsi, les résultats révèlent seulement une tendance et ne sont pas significatifs. Ils ne permettent pas de confirmer que les performances en arithmétiques et en gnosies digitales soient corrélées.

1.2. Performances arithmétiques versus performances au test informatique.

On a voulu mettre en rapport les niveaux arithmétiques des sujets avec les compétences de comptage mises en jeu lors de notre protocole expérimental. Les analyses de corrélation de Pearson (r) n'ont pas permis de mettre en évidence de liens entre les performances arithmétiques et les performances aux deux conditions doigts et pions du test informatisé. En effet, aucune corrélation ou tendance n'ont été trouvées, qu'il s'agisse du score total à l'épreuve de Shalev, de la vitesse de réalisation de l'épreuve de Shalev ou du score d'aucun subtest de cette épreuve avec aucune des performances au test informatisé, qu'il s'agisse de la condition doigts ou pions.

Par contre, on note une corrélation entre les performances à l'épreuve informatique pour les conditions pions et doigts et il n'y a pas d'effet plafond ($r = .865$; $p < .001$).

Ainsi, nous pouvons dire que les performances pour l'épreuve arithmétique et pour l'épreuve informatisée ne sont pas corrélées, mais que cela ne relève pas du fait que l'épreuve informatisée ne soit pas sensible. De plus, les sujets ont montré un bon investissement pour l'épreuve informatisée.

Par ailleurs, on relève une corrélation négative entre la première épreuve du test arithmétique et l'épreuve du test informatique pour la condition doigts. La première épreuve du test arithmétique Shalev porte sur les connaissances factuelles sur le nombre. Il s'agit de 5 additions simples, 5 soustractions, 5 multiplications et 5 divisions. Elle figure dans les annexes de ce mémoire.

En effet, l'analyse de corrélation de Pearson (r) permet d'observer une corrélation négative entre les scores au premier subtest de l'épreuve arithmétique et le test informatique en condition doigts ($r = -.521$; $p = .046$; Figure 8).

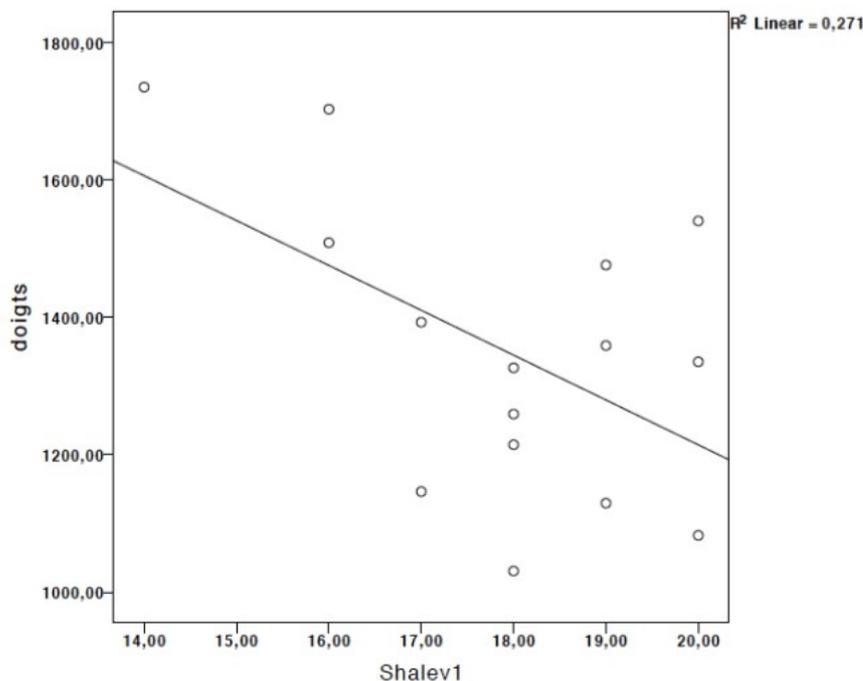


Figure 8 : Performances au premier subtest arithmétique et à la partie doigts du test informatique.

Ainsi, moins les sujets sont bons à la première épreuve du test arithmétique (la plus simple) meilleures sont leurs performances au test informatique en condition doigts.

Rappelons donc que nous n'avons pas observé de corrélation entre les performances arithmétiques et les gnosies digitales ni de corrélation entre les performances arithmétiques et celles de l'épreuve informatisée en condition doigts ou pions sauf une corrélation négative qui révèle le fait que les moins bons en arithmétique (qui ont échoué à l'épreuve arithmétique la plus simple) sont ceux qui ont les meilleures performances pour le test informatique en condition doigts. On note aussi que les sujets se sont bien investis dans notre protocole expérimental informatique et que ce test est sensible.

2. Analyses de la partie expérimentale informatique

Nous focalisons l'analyse sur la partie expérimentale informatique. Nous présentons les performances pour les différentes conditions et les confrontons deux à deux.

2.1. Conditions doigts versus pions.

Nous avons émis l'hypothèse que les sujets seraient plus rapides sur les doigts que sur les pions. La comparaison des moyennes pour données paires a mis en évidence le résultat inverse, les sujets sont plus rapides pour traiter les pions ($M = 1152$ ms ; $ET = 204$ ms) que les doigts ($M = 1355$ ms ; $ET = 229$ ms). Ces résultats sont significativement différents ($p < .001$).

2.2. En condition doigts, configuration canonique versus non canonique

Nous voulons vérifier ici que, comme rapporté dans la littérature, les configurations canoniques des doigts ont une plus-value sémantique par rapport aux configurations non canoniques. La comparaison de moyennes (test - t) pour données paires a permis de constater que les sujets sont plus rapides pour l'épreuve des doigts quand les doigts sont présentés dans leur configuration canonique ($M = 1266$ ms ; $ET = 195$ ms) que quand ils sont présentés dans leur configuration non canonique ($M = 1432$ ms ; $ET = 236$ ms) pour $p \leq .001$.

2.3. En condition canonique ou congruente, doigts versus pions

En bloquant la variable aléatoire canonique ou congruente, on a voulu comparer les vitesses des sujets pour la condition doigts et la condition pions. La comparaison de moyennes (test – t) pour données paires, [(pions incongruents - pions congruents)/(doigts incongruents – doigts congruents)] a permis de mettre en évidence que les sujets sont beaucoup plus rapides sur l'épreuve informatique en condition pions ($M = -2$) que sur l'épreuve informatique en condition doigts ($M = 165$). La différence est significative ($p < .001$).

Ainsi, même si pour la condition doigts, les performances sur les configurations canoniques (congruentes) sont meilleures que sur les configurations non canoniques, elles restent bien moins rapides que les performances sur les épreuves en condition pions, que leur présentation soit congruente ou même incongruente.

2.4. En condition doigts, mains sur les genoux versus mains dans le dos.

Nous vérifions ici le rôle de la position des mains pour les performances de comptage. La comparaison de moyennes par données paires n'a pas permis de mettre en évidence que les sujets sont meilleurs en condition doigts lorsqu'ils ont les mains en regard de celles qui leurs sont présentées à l'écran ($M = 1382$ ms ; $ET = 190$ ms) que quand ils ont leurs mains croisées dans le dos ($M = 1316$ ms ; $ET = 264$ ms) ($p = .154$ (non significatif)).

2.5. En condition doigts, espace proche versus espace lointain

Nous évaluons ici l'influence de la position de l'écran sur lequel sont présentées les diapositives. La comparaison de moyennes par données paires n'a pas permis de mettre en évidence que les sujets sont meilleurs à l'épreuve des doigts lorsque l'écran est dans leur espace proche ($M = 1387$ ms ; $ET = 279$ ms) que lorsque l'écran est éloigné ($M = 1310$ ms ; $ET = 187$ ms) avec $p = .176$ (non significatif)

Pour conclure sur cette présentation des résultats des passations du protocole de test par nos sujets jeunes adultes, nous pouvons dire que pour une tâche de comptage, en opposant la condition doigts à la condition pions et en testant l'influence de la position des mains et la position de l'écran dans l'espace, les doigts ne se sont pas révélés ici comme un meilleur support que les pions.

Enfin, nous n'avons pas pu constater, comme c'est pourtant rapporté par la littérature, que le niveau en arithmétique est corrélé au niveau en gnosies digitales.

Discussion

Notre étude porte sur l'importance de la représentation des doigts dans la maîtrise de l'arithmétique. Nous avons cherché à montrer l'efficacité du support des doigts pour une tâche de comptage. Avant de soumettre les sujets au test informatique qui examine cette question, nous avons fait passer des épreuves pour évaluer les performances en arithmétique et en gnosies digitales des sujets. Nous voulions vérifier la corrélation de ces deux compétences, et les mettre en rapport aux performances au test informatique. Afin de nous rendre compte de l'efficacité du support des doigts pour une épreuve arithmétique de comptage informatisée, nous avons opposé une présentation de doigts à une présentation de pions. Nous avons supposé que les sujets auraient de meilleures performances en condition doigts qu'en condition pions.

Ce protocole de test est aux prémices d'une étude destinée à être menée auprès d'enfants dans une visée pédagogique et il est donc soumis, dans une première phase que constitue notre étude, à de jeunes adultes.

Ce test n'a pas révélé de corrélation qui permettrait de conclure que, chez les jeunes adultes testés, les doigts sont un support cohérent pour l'arithmétique.

1. Interprétation des résultats

Nous revenons sur les résultats rapportés dans la partie précédente pour expliquer pourquoi, pour notre étude, les performances générales n'ont pas montré que les doigts sont un support de comptage privilégié aux pions.

1.1. Tendance à la corrélation entre les performances en arithmétiques et en gnosies digitales

Avant d'aborder la question des doigts comme support cohérent pour une épreuve de comptage, il convenait d'observer la possible corrélation des compétences arithmétiques et des gnosies digitales puisque cette corrélation a été rapportée dans la littérature. L'analyse et la confrontation des résultats au test des gnosies de Galifret-Granjon (1964) et au test arithmétique n'ont permis d'observer

qu'une tendance. Cela ne permet pas de confirmer de manière ferme que les performances en gnosies digitales et les performances en arithmétiques sont corrélées chez nos sujets adultes.

Pourtant les preuves apportées par les deux expériences menées auprès d'enfants par Fayol, Barrouillet et Marinthe (1998) d'une part et Noël (2005) d'autre part démontrent le pouvoir prédictif des gnosies digitales pour les compétences mathématiques. Nous nous attendions à ce que les niveaux de ces deux compétences soient systématiquement en corrélation.

Toutefois, comme nous l'avons déjà précisé, les deux expériences qui prouveraient ce lien n'ont été que les seules rapportées dans la littérature des sciences cognitives.

En fait, même si l'agnosie digitale chez l'enfant est liée à des difficultés spécifiques en arithmétique (Kinsbourne et Warrington, 1963), avec un développement normal de la connaissance des doigts, il n'y aurait peut-être pas de corrélation entre gnosies digitales et compétences arithmétiques. Le test des gnosies digitales de Galifret-Granjont (1964) est un test inspiré de la batterie de tests originale de 1951 de Benton, Hutcheon et Seymour. Ces derniers avaient utilisé leur batterie dans une étude comparative auprès d'enfants pour justement étudier cette corrélation et leur conclusion était qu'il n'y a pas, même faiblement, de corrélation entre performances arithmétiques et gnosies digitales (Galifret-Granjont, 1964).

Ainsi, nous ne nous attendions pas à retrouver une corrélation évidente entre le niveau en gnosies digitales et le niveau en arithmétique. D'autant plus que notre protocole de test est mené chez des adultes. Les deux études des équipes de Fayol et Noël ont été menées chez des enfants. Dans la littérature scientifique, les preuves qui rapporteraient le lien entre gnosies digitales et compétences arithmétiques chez les adultes portent sur des études plus complexes des comportements dans l'espace (Fischer M.H, Brugger P, 2011) ou sur des études impliquant l'imagerie cérébrale (Tang et al ; 2006) et les stimulations cérébrales (Rusconi, Walsh et Butterworth, 2005 ; Sato et al ; 2007). Elles permettent de dire que les doigts sont un outil de la cognition incarnée et que physiologiquement, les substrats neuronaux des gnosies digitales et des compétences mathématiques sont intriqués.

Concernant notre protocole de test, on a des raisons de penser que peut-être chez des enfants, il pourrait révéler la corrélation entre gnosies digitales et compétences mathématiques. En effet, si l'on se situe d'un point de vue développemental, on constate que lors de l'apprentissage des mathématiques, les enfants utilisent leurs doigts pour s'aider à compter, à calculer. Mais à un certain âge, les doigts deviennent des outils obsolètes et a priori, ils sont désinvestis dans le développement des compétences mathématiques. Ainsi, chez les adultes, comparer le niveau en gnosies digitales et en arithmétique avec des tests pour les enfants est peut-être absurde.

On s'interroge sur la sensibilité du test à évaluer les gnosies digitales chez les adultes. En effet, le test de gnosies digitales de Nadine Galifret-Granjon (1964) a été élaboré pour une population d'enfants de 6 à 14. Pour cette population, elle avait pu observer une dispersion des résultats. Les résultats de nos sujets adultes au test des gnosies sont peu dispersés et le test a un effet plafond. Ce test est pourtant le test de référence quand on s'intéresse aux gnosies digitales.

Pour conclure sur ce résultat mitigé, nous pouvons dire qu'il n'était pas surprenant vu le peu de preuves dans la littérature d'une corrélation réelle entre les gnosies digitales et les compétences arithmétiques. De plus, le protocole n'est sûrement pas adéquat pour mesurer une telle corrélation chez les adultes, d'autant plus qu'on évalue les gnosies digitales avec un test pour enfants.

1.2. Pas de corrélation entre les performances arithmétiques et les performances à l'épreuve informatisée

Il n'y a pas de rapport entre le niveau arithmétique des sujets et leurs performances à la tâche de comptage mise en jeu lors de notre protocole expérimental. Ce résultat pourrait mettre en doute la validité de notre protocole et son objectif pédagogique. Si la tâche de comptage non symbolique mise en jeu dans le test informatique n'a rien à voir avec des capacités arithmétiques, notre protocole

n'aurait pas d'intérêt pour mesurer le fait que les doigts sont un bon support pour les mathématiques. On peut expliquer de trois façons le fait qu'on n'ait pas trouvé de corrélation entre les performances pour l'épreuve arithmétique et pour l'épreuve informatisée.

Premièrement, on peut s'interroger sur la sensibilité du test informatique à révéler les performances des sujets pour une épreuve non symbolique de comptage ou sur le fait qu'il y ait pu y avoir des biais pendant les passations.

L'analyse statistique des résultats permet de noter à l'épreuve informatisée une forte corrélation entre les performances en condition pions et en condition doigts et aucun effet plafond. Nous pouvons dire alors que les sujets étaient bien investis dans la passation et ont répondu sérieusement au test au maximum de leurs possibilités. Ainsi même si les performances pour l'épreuve arithmétique et pour l'épreuve informatisée ne sont pas corrélées, cela ne relève pas du fait que l'épreuve informatisée ne soit pas sensible ou biaisée.

Deuxièmement, le test Shalev est-il vraiment révélateur des compétences arithmétiques ? On entend par un test arithmétique refléter la maîtrise de la manipulation du nombre. Or, pour réaliser le protocole Shalev, selon nous, ce sont des compétences bien plus complexes qui sont testées. Il s'agirait de procédures de calcul qui relèvent plutôt de la capacité de sujet à savoir comment faire, la connaissance de méthodes scolaires qui éloignent le sujet de la sémantique du nombre, du système de représentation des quantités.

En fait, pour observer véritablement la manipulation des quantités il faudrait observer un moyen de calcul qui fasse directement appel à la représentation des quantités, à la sémantique du nombre. Il faudrait qu'il mette en jeu des opérations non complexes qui ne font pas appel au calepin visuo spatial ou aux faits arithmétiques. Il pourrait s'agir d'additions rapides de quantités à l'oral. Alors, on comparerait les résultats du calcul oral aux résultats du test informatisé où les mêmes additions simples sont présentées en condition doigts et pions.

Un problème dans cette idée est que les petites quantités font appel aux faits arithmétiques et cela biaiserait notre moyen d'observation directe des manipulations des quantités. Il faudrait trouver alors des sujets qui n'ont pas encore acquis les faits arithmétiques des additions, comme des enfants. Toutefois, si l'on demande à des enfants de faire des additions à l'oral, ils vont s'aider de leurs doigts pour compter. Ce serait bien la preuve du besoin du support pour se représenter les quantités à manipuler. Pour faire appel à leurs représentations mentales des quantités, on leur demanderait alors de ne pas s'aider de leurs doigts. Si l'on considérait un tel test avec adultes, en épreuve préliminaire, on testerait les faits arithmétiques des additions pour ne sélectionner que les adultes qui n'ont pas acquis les faits arithmétiques des additions.

Troisièmement, quelle compétence est mise en jeu dans le test informatique ? Il y a-t-il un rapport entre cette compétence et les compétences arithmétiques du test Shalev ? La consigne du test informatique est de compter : compter les doigts, compter les pions le plus rapidement possible. En fait, on demande au sujet d'appréhender les quantités qui lui sont présentées de manière exacte. Autrement dit : est-ce que leur système de représentation exacte des quantités est assez efficace ? Finalement, la confrontation des résultats au test arithmétique de Shalev et des performances au test informatisé a pour objectif d'observer si ces deux compétences sont liées : a-t-on besoin d'avoir une bonne représentation des quantités pour manipuler le nombre ? Comme il n'y a pas de corrélation entre ces résultats, il se pourrait que ces deux compétences soient indépendantes.

Les associations spationumériques (Fischer et Brugger, 2011) tendent déjà à affirmer que l'appréhension des quantités est une cognition incarnée. Mais peut-être que cette preuve ne peut être apportée que pour l'appréhension des quantités et pas pour le calcul, la manipulation des quantités. On pourrait ainsi considérer que les doigts, outil de la cognition incarnée, sont un support au développement des compétences arithmétiques, pour soulager la mémoire, s'assurer d'une bonne manipulation basique des quantités. Mais plus tard dans le développement, pour les calculs complexes qui sont posés sur papier, ce support n'est plus nécessaire.

Ainsi les doigts ne fonctionneraient vraiment que comme un code additionnel. Et, comme poser un calcul sur papier, s'aider de ses doigts pour le calcul soulage la mémoire de travail.

En fait, la confrontation des résultats pour l'épreuve arithmétique et pour l'épreuve informatisée a permis de constater un résultat auquel on s'attendait. En effet, on a observé une corrélation négative qui montrerait que moins les sujets sont bons à la première épreuve du test arithmétique (la plus simple) meilleures sont leurs performances au test informatique sur les doigts. Ce n'est pas surprenant de reconnaître que les adultes qui sont les moins bons en mathématiques s'aident du support des doigts pour compter. En effet, si les doigts sont un soutien au calcul, les moins bons en calcul l'utilisent le plus, même à l'âge adulte. Ces adultes voient leur performance en comptage améliorée quand il s'agit de compter des doigts, auxquels ils seraient plus familiers que les pions.

En conclusion, comme il n'y a pas de corrélation entre les résultats pour l'épreuve arithmétique et pour l'épreuve informatisée, il se pourrait que la représentation des quantités et la manipulation du nombre soient deux compétences indépendantes, si l'épreuve Shalev pour évaluer la manipulation du nombre était toutefois efficace.

1.3. Meilleures performances pour la condition pions que pour la condition doigts

Pour prouver que les doigts sont un support privilégié et cohérent à proposer pour l'apprentissage des mathématiques, nous avons élaboré une épreuve informatisée avec une tâche de comptage dans laquelle on oppose la condition doigts à une condition pions. Pour dire que les doigts sont un support privilégié par rapport aux pions dans ce test, il aurait fallu constater de meilleures performances générales en condition doigts. Les résultats de notre étude montrent l'inverse : les sujets sont en général plus rapides en condition pions qu'en condition doigts. Ainsi, même si les doigts sont considérés comme un outil des cognitions incarnées, par rapport aux pions, notre étude ne prouve pas que c'est un support privilégié pour les

épreuves d'arithmétique, en tout cas sur notre échantillon. En effet, notre échantillon de 20 jeunes adultes est restreint et n'est pas vraiment représentatif de la population « jeunes adultes » générale.

Pourtant dans une étude de 2010 de Badets, Pesenti et Olivier, dans une tâche où les participants adultes devaient fournir une réponse orale à une addition simple qui déclenchait une proposition de résultat correct ou non, sous forme de bâtonnets ou de représentation canonique de doigts, les réponses sont plus rapides avec les représentations canoniques de doigts. Cette étude tend à montrer que les doigts sont un support privilégié par rapport à des bâtonnets, notre étude contribuerait-elle à dire qu'ils ne sont pas privilégiés par rapport à des pions ? En tout cas, pour une tâche arithmétique non symbolique, notre étude n'apporte pas de cohérence qui permettrait de confirmer que les doigts sont un support privilégié chez les adultes.

Pour notre protocole de test, on pourrait s'attendre à un résultat différent si le test était passé auprès d'enfants. En effet, il est établi que les doigts sont un support à l'arithmétique et que les enfants s'en aident beaucoup au début de leur apprentissage (Crollen, Seron, Noël, 2011). On peut supposer que les enfants, contrairement aux adultes, ne sont pas assez expérimentés en arithmétique pour s'en affranchir.

En pratique, on a même remarqué dans notre étude que les adultes les moins bons en arithmétique, qui ont eu les plus mauvais scores à l'épreuve la plus simple du protocole Shalev sur les connaissances factuelles sur le nombre, ont eu les meilleures performances pour les épreuves en condition doigts. Ainsi les « non-experts » en arithmétique sont ceux qui sont les plus familiers avec le support des doigts. Alors, si l'on menait ce test auprès d'enfants, en tant que population « non experte », on pourrait observer, en comparant les résultats en condition doigts et en condition pions, que les performances générales sont meilleures en condition doigts et donc que le support des doigts est privilégié par rapport aux pions. Ainsi on suggérerait que les doigts sont un support cohérent à présenter aux enfants pour le développement de l'arithmétique.

On pourrait aussi expliquer le résultat de notre étude d'un point de vue développemental : si, au cours du développement de ses compétences mathématiques, l'individu est amené à abandonner la représentation des nombres par les doigts, il continue à être exposé à la représentation du nombre par des pions et par un entraînement induit, il devient « expert » à compter des pions. Prenons l'exemple des dés : on constate que les enfants apprennent à lire les faces d'un dé, quand la configuration des points est acquise elle devient évidente et la lecture est immédiate. Même si la configuration des pions dans notre étude ne respectait pas du tout le même genre de disposition que sur les faces d'un dé, on peut faire l'hypothèse que nos sujets adultes sont plus familiers avec les pions en général qu'avec les doigts, puisque les adultes sont plus exposés aux représentations du nombre par des pions.

En fait, même chez les enfants, alors qu'il est établi que les doigts jouent un rôle certain dans le développement du système de comptage par les nombreux avantages qu'ils présentent comme support, ils ne sont pas nécessaires pour le développement du nombre (Crollen, Seron et Noël 2011). En effet rappelons-le, si les enfants n'ont pas intégré la comptine numérique, l'utilisation de la configuration des doigts pour représenter les nombres n'est pas suffisante pour permettre le développement d'une représentation exacte du nombre. Ensuite, l'utilisation des doigts est rare quand les modèles de comptage des doigts ne sont pas inculqués, comme chez les enfants aveugles. Enfin, les enfants qui n'utilisent pas leurs doigts pour compter ne montrent pas de développement du nombre atypique ou retardé.

Un autre effet est à prendre en compte si on veut expliquer le résultat de notre étude : si les sujets ne sont pas plus familiers avec les doigts qu'avec les pions, à égalité sur le plan symbolique, leur analyse visuelle n'est pas la même. En effet, les sujets rapportent qu'ils sont distraits en condition doigts par les détails de la main qui n'interviennent pas pas le comptage, en l'occurrence les doigts pliés. Ainsi les doigts sont plus distrayants visuellement que les pions, ainsi les sujets seraient moins rapides sur la partie doigts que sur la partie pions.

Si le test était passé auprès d'enfants et si on constatait le même résultat, il pourrait peut-être permettre d'observer le développement du système

d'approximation du nombre, le SAN (Fayol, 2012). Ainsi, peut-être que dès l'enfance le comptage des pions est surentraîné par rapport au comptage de doigts. Peut-être que les pions seraient alors un support plus cohérent que les doigts pour le développement des mathématiques. Après tout, c'est ce que le manuel d'apprentissage du calcul « J'apprends les maths avec Picbille CP » (2012) exploite.

Nous pouvons toutefois souligner que le résultat de notre étude ne permet pas d'exclure les doigts comme un support cohérent à présenter aux enfants pour soutenir le développement de l'arithmétique. En effet, une étude de Andersson (2010) présente les doigts comme un substitut de la mémoire de travail. L'étude montre par ailleurs que le calepin visuo-spatial de la mémoire de travail présente des faiblesses chez les enfants ayant des difficultés en mathématiques. Ainsi, les doigts constitueraient un indice visuo-spatial, pouvant se substituer au calepin visuel et alléger la charge cognitive de la mémoire de travail. En effet, ils permettent de représenter une quantité toujours disponible, avec une possibilité de contrôle visuel, c'est-à-dire que l'information qui ne peut pas être mise dans la mémoire de travail peut être représentée sur les doigts, réutilisée et modifiée, puisque les doigts sont des entités manipulables.

1.4. Meilleures performances pour les configurations canoniques de la condition doigts

Au test informatique, en condition doigts, les sujets sont plus rapides quand les doigts sont présentés dans leur configuration canonique. On pouvait s'attendre à ce résultat. En effet, Di Luca (2010) tend à montrer par ses expériences que les configurations canoniques des doigts sont un code symbolique des quantités.

Cependant, en regard de ce résultat, l'analyse statistique nous a aussi permis d'observer que nos sujets ont été beaucoup plus rapides en général en condition pions qu'en condition doigts, en ne prenant en compte que les performances en configuration canonique. Alors, si les doigts en configuration canonique sont un code symbolique du nombre, pourquoi est-ce que nos sujets restent plus rapides pour la

tâche de comptage en condition pions ? Est-ce que ce résultat tend à donner tort à Di Luca (2010) et ses associés ?

Pour explorer ces résultats, analysons les étapes de la tâche de comptage en condition doigts canoniques ou en condition pions. Pour le comptage des doigts en configuration canonique, les sujets ont rapporté qu'ils reconnaissent les nombres et procèdent à une addition (2 étapes). Pour le comptage des pions en présentation congruente, c'est presque la même chose : par subitizing les sujets reconnaissent les petites quantités et les additionnent (2 étapes). Pour le comptage des pions dans leur présentation non congruente, les sujets comptent les pions un à un avec la comptine numérique (1 étape plus ou moins longue).

Si l'on résume la tâche du comptage à sa première étape, la reconnaissance des quantités, les sujets sont beaucoup plus rapides pour reconnaître des pions que pour reconnaître des doigts dans leur configuration canonique. On pourrait conclure que même si les doigts dans leur configuration canoniques ont un statut sémantique, ce statut n'est pas si fort, comparé à des pions reconnus par subitizing. L'appréhension immédiate des quantités serait plus efficace que la reconnaissance des doigts. Le statut symbolique des pions serait supérieur à celui des doigts.

Ainsi, alors que Di Luca et ses associés (2011) voudraient que les configurations canoniques des doigts, par le statut symbolique, intègrent le triple code de Dehaene (2003), à notre sens ce n'est pas justifié. En effet, les trois représentations (analogique, visuelle arabe et verbale) ne souffrent pas d'une hiérarchie, alors que les doigts en configuration canonique seraient moins bien reconnus que des pions.

1.5. Pas d'effet de la position des mains ou de la position de l'écran

En introduisant la variable de la position des mains et la variable de la position de l'écran, on a tenté d'observer un effet d'appropriation des mains représentées à l'écran par le sujet. En effet, on pensait que en condition doigts, avec les mains sur

les genoux et l'écran proche, le sujet par un effet d'illusion visuelle s'approprierait les mains représentées à l'écran comme étant les siennes. La manipulation a échoué. Il n'y aurait pas d'effet de l'appropriation du support par association des mains de l'écran à celles du sujet sur la performance de comptage.

Plus simplement, il n'y aurait pas d'appropriation du support du tout. On a pourtant essayé de reproduire un effet reconnu et observé dans l'expérience du Rubber hand effect (1998).

On peut reconnaître que si notre expérience cherchait à reproduire le même effet d'appropriation, les conditions n'ont rien à voir avec celles de l'expérience du Rubber hand effect. Comment espérer « piéger » le cerveau avec un écran plat, quasiment à la verticale, avec des mains en deux dimensions, qui ne sont pas dans une projection de l'espace qui pourrait être cohérente pour l'association des mains virtuelles au sujet ? L'écran aurait dû au moins être à l'horizontale, directement au-dessus des mains du sujet placées sous la table.

Conclusion

Le but de notre étude était d'apporter plus de matériel à l'étude de l'importance de la représentation des doigts dans la maîtrise de l'arithmétique. Cette étude constitue la première phase de l'élaboration d'un protocole destiné aux enfants à des fins pédagogiques, nous l'avons soumis ici à de jeunes adultes. Notre protocole expérimental avait pour objectif de montrer l'efficacité du support des doigts pour une épreuve arithmétique de comptage.

Pour cela, nous avons dans un premier temps testé la corrélation des compétences en gnosies digitales et en arithmétique. Nous les avons ensuite confrontées aux résultats du test informatique. Ce test consistait en une épreuve arithmétique de comptage, dans laquelle les performances sur un support de doigts étaient opposées aux performances sur un support de pions.

Ce test n'a pas révélé de corrélation qui permettrait de conclure que, chez les jeunes adultes testés, les doigts sont un support cohérent pour l'arithmétique par rapport aux pions. Nous n'avons pas non plus confirmé que les compétences en gnosies digitales et en arithmétiques sont fonctionnellement liées.

Toutefois, cette étude n'est pas suffisante pour dire que les doigts ne sont pas un support cohérent à présenter aux enfants pour soutenir le développement des compétences arithmétiques. En effet, les doigts sont un substitut de la mémoire de travail et aident au calcul (Anderson, 2010). Et l'on constate que la méthode de comptage des doigts est très investie par les enfants lorsque les modèles leur sont présentés. Peut-être même sont-ils, en une certaine mesure, surinvestis par les enfants à une période du développement de leurs compétences mathématiques (Domahs, Krinzinger, Willmes, 2008). Et quand la méthode basique de comptage sur les doigts devient obsolète à un certain âge et à un niveau attendu, certains individus même adultes rapportent qu'ils se servent toujours de leurs doigts pour compter, d'ailleurs notre étude a suggéré que les adultes les moins performants en arithmétique étaient toujours familiers au support des doigts.

Nous avons des raisons de penser que si cette étude était menée chez les enfants, notre protocole expérimental serait plus probant et permettrait d'apporter des preuves destinées à donner de nouvelles pistes pédagogiques pour les cognitions mathématiques.

Bibliographie

- Alibali M.W, DiRusso A.A (1999) The function of gesture in learning to count: more than keeping track. *Cognitive Development*, 14: 37–56. Anderson M.L (2010) Neural reuse: A fundamental organizational principle of the brain. *Behavioral And Brain Sciences*, 33: 245–313.
- Andersson U (2010). Skill development in different components of arithmetic and basic cognitive functions: findings from a 3-year longitudinal study of children with different types of learning difficulties. *Journal of educational psychology*, 102: 115–134.
- Andres M, Di Luca S, Pesenti M (2008) Finger counting: The missing tool?. *Behavioral and Brain Sciences*, 31: 642–643.
- Andres M, Olivier E, Badets A (2008) Actions, words, and numbers: a motor contribution to semantic processing? *Current Directions in Psychological Science*, 17: 313–317.
- Badets A, Pesenti M, Olivier E (2010) Response-effect compatibility of finger-numeral configurations in arithmetical context. *Psychology*, 63: 16–22.
- Benton A.L, Hutcheon Y, Seymour F (1951) Arithmetic ability, finger localisation capacity, and left-right discrimination in normal and defective children. *Am J. Orthopsychiat*, 4 : 756
- Botvinick M, Cohen J (1998). Rubber hands 'feel' touch that eyes see. *Nature*, 391:756.
- Crollen V, Seron X, Noël M.P (2011) Is finger-counting necessary for the development of arithmetic abilities? *Frontiers in Psychology*, 2: 1–3.
- Clerc O, Lelièvre F, Suire F, Ouzaoulias A, Brissiaud R (2012), *J'apprends les maths avec Picbille CP*, Paris, Retz.
- Dehaene S, Bossini S, Giraux P (1993) The mental representation of parity and number magnitude. *Journal of Experimental Psychology*, 3 : 371-396
- Dehaene S (1997) *La bosse des maths*. Paris : Odile Jacob. Dehaene S, Piazza M, Pinel P, Cohen L (2003) Three parietal circuits for number processing. *Cognitive Neuropsychology*, 20: 487–506. Dehaene S, Bossini S, Giraux P (1993) The mental representation of parity and number magnitude. *Review of General Psychology*, 122: 371–396.
- Dehaene S (2002) Precipice of the Number Sense In: *Mind and Language*, 16: 16–36
- Dehaene S, Piazza M, Pinel P, Cohen L (2003) Three Parietal Circuits For Number Processing, *Cognitive Neuropsychology*, 20 : 487-506
- Dehaene S, Cohen L (2007) Cultural Recycling of Cortical Maps. *Neuron*, 56: 384–398.

- Di Luca S, Granà A, Semenza C, Serona X, Pesenti M (2006) Finger–digit compatibility in Arabic numeral processing. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 59:1648–1663.
- Di Luca S, Pesenti M (2008) Masked priming effect with canonical finger numeral configurations. *Experimental Brain Research*, 185: 27–39.
- Di Luca S, Lefèvre N, Pesenti M (2010) Place and summation coding for canonical and non-canonical finger numeral representations. *Cognition*, 117: 95–100.
- Di Luca S, Pesenti M (2011) Finger numeral representations: more than just another symbolic code. *Frontiers in Psychology*, 2 : 272.
- Domahs F, Krinzinger H, Willmes K (2008) Mind the gap between both hands: Evidence for internal finger-based number representations in children’s mental calculation. *Cortex*, 44: 359–367.
- Fayol M, Barrouillet P, Marinthe C (1998) Predicting mathematical achievement from neuropsychological performance: a longitudinal study. *Cognition*, 68: 63–70.
- Fayol M, Seron, X (2005) About numerical representations: insights from neuropsychological, experimental and developmental studies. In: *Handbook of Mathematical Cognition*, New York, ed. J. I. D. Campbell: 3–22.
- Fayol M (2012). *L’acquisition du nombre*. 2 éd. Paris : Presses Universitaires de France, 127p.
- Fischer J.P (2010) Numerical performance increased by finger training: A fallacy due to regression toward the mean? *Cortex*, 46: 272–273.
- Fischer M.H, Brugger P (2011) When Digits Help Digits: Spatial—Numerical Associations Point to Finger Counting as Prime Example of Embodied Cognition. *Frontiers in Psychology*, 2 : 260.
- Fuson K.C, Richards J, Briars D.J (1982) The acquisition and elaboration of the number word sequence. In: *Children’s Logical and Mathematical Cognition*, New York, ed. C. J. Brainerd: 33–92.
- Galifret-Granjon N (1964). Tests des gnosies digitales. In : *Organisation temporelle et spatiale*. Paris, Delachaux & Niestlé, 2 : 57-85.
- Gerstmann J (1924) Finger agnosie: eine umschriebene Störung der Orientierung am eigenen Körper. *Wiener klinische Wochenschrift*, 37 : 1010–1012.
- Gerstmann J (1940) Syndrome of finger agnosia, disorientation for right and left, agraphia, and acalculia. *Archives of Neurology and Psychiatry*, 44: 398–408.
- Gracia-Bafalluy M, Noël M.P (2008) Does finger training increase young children’s numerical performance? *Cortex*, 44: 544–560.
- Gulledge J.P (2006) Hemispheric Differences in Numerical Cognition: A comparative investigation of how primates process numerosity. *Psychology Dissertations*. http://digitalarchive.gsu.edu/psych_diss/12

- Hung Y. H, Hung D.L, Tzeng O.J.L, Wu D.H (2008) Flexible spatial mapping of different notations of numbers in Chinese readers. *Cognition*, 106: 1441–1450.
- Ifrah G (2000) *The Universal History of Numbers*. London, Harvill.
- Kaufmann L, Vogel SE, Wood G, Kremser C, Schocke M, Zimmerhackl LB, Koten JW (2008) A developmental fMRI study of non-symbolic numerical and spatial processing. *Cortex*, 44:376–385. Kinsbourne M, Warrington E (1963) The Developmental Gerstmann Syndrome. *Archives of Neurology*, 8: 490–501.
- Kinsbourne M, Warrington EK (1963) A study of visual perseveration. *Journal of Neurology, Neurosurgery and Psychiatry* 26:468-475.
- Le Bel Beauchesne G, Macoir J, Bier N (2009). Des noms et des nombres : dissociation entre les habiletés sémantiques et numériques dans la démence sémantique. *Revue de neuropsychologie*, 1 : 299-311.
- Libertus M. E, Brannon E (2009). Behavioural and neural basis of number sense in infancy. *Current Direction of Psychological Science*, 18: 346–351.
- McCloskey M, Caramazza A, Basili AG (1985) Cognitive mechanisms in number processing and calculation: Evidence from dyscalculia. *Brain and Cognition*, 4 : 171-96.
- Ménissier A (2014) Du glissement de l'appellation logico-mathématique à celle de cognitions mathématique : quelles incidences sur la prise en charge des troubles ? *Les entretiens de Bichat*, 2014
- Moyer R. S, Landauer T. K (1967) Time required for judgements of numerical inequality. *Nature*, 215: 1519–1520.
- Noël M.P (2005) Finger gnosis: a predictor of numerical abilities in children? *Child Psychology*, 11: 413–430.
- Oldfield R.C, (1971). The assessment and analysis of handedness: The Edinburgh inventory. *Neuropsychologia*. England Pergamon Press, 9:97–113
- Opfer J.E, Furlong E.E (2011) How numbers bias preschoolers' spatial search. *Journal of Cross-Cultural Psychology*, 42: 682–695.
- Penner-Wilger M, Anderson M.L (2013) The relation between finger gnosis and mathematical ability: why redeployment of neural circuits best explains the finding. *Front Psychol*, 4: 877.
- Pesenti M, Seron X, Noël M-P (2014). L'évaluation des troubles du calcul et du traitement du nombre. In : Seron X, Van der Linden M (Eds). *Traité de neuropsychologie clinique de l'adulte*. Paris, De Boeck supérieur, Solal: 599–617
- Plaisier M.A, Smets J.B.J (2011) Number magnitude to finger mapping is disembodied and topological. *Experimental Brain Research*, 209: 395–400.

- Reynvoet B, Brysbaert M, Fias W (2002) Semantic priming in number naming. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 55: 1127–1139.
- Roggeman C, Verguts T, Fias W (2007) Priming reveals differential coding of symbolic and non-symbolic quantities. *Cognition*, 105: 380–394.
- Rourke B.P, Finlayson M.A.J (1978) Neuropsychological significance of variations in patterns of academic performance: Verbal and visuo-spatial abilities. *Journal of Abnormal Child Psychology*, 6: 121–133.
- Rourke, B.P, Strang J.D (1978) Neuropsychological significance of variations in patterns of academic performance: Motor, psychomotor, and tactile-perceptual abilities. *Journal of Pediatric Psychology*, 3: 62–66.
- Rourke B.P (1993) Arithmetic disabilities, specific and otherwise: A neuropsychological perspective. *Journal of Learning Disabilities*, 26: 214–226.
- Rourke B.P, Conway J.A (1997) Disabilities of arithmetic and mathematical reasoning: Perspectives from neurology and neuropsychology. *Journal of Learning Disabilities*, 30: 34–46.
- Roux F.E, Boetto S, Sacko O, Chollet F, Trémoulet M (2003) Writing, calculating, and finger recognition in the region of the angular gyrus: a cortical stimulation study of Gerstmann syndrome. *Journal of Neurosurgery*, 99: 716–727.
- Rubinsten O, Henik A (2005). Automatic Activation of Internal Magnitudes: A Study of Developmental Dyscalculia. *Neuropsychology*, 19: 641-618
- Rusconi E, Walsh V, Butterworth B (2005) Dexterity with numbers: rTMS over left angular gyrus disrupts finger gnosis and number processing. *Neuropsychologia*, 43: 1609–1624.
- Rusconi E, Pinel P, Dehaene S, Kleinschmidt A (2010) The enigma of Gerstmann's syndrome revisited: a telling tale of the vicissitudes of neuropsychology. *Brain*, 133: 320–332.
- Sato M, Cattaneo L, Rizzolatti G, Gallese V (2007) Numbers within our hands: modulation of corticospinal excitability of hand muscles during numerical judgement. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 19: 684–693.
- Shaki S, Fischer M.H (2008) Reading space into numbers: a cross-linguistic comparison of the SNARC effect. *Cognition*, 108: 590–599.
- Shaki S, Fischer M.H, Petrusic W.M (2009) Reading habits for both words and numbers contribute to the SNARC effect. *Psychonomic Bulletin and Review*, 16: 328–331.
- Suresh PA, Sebastian S (2000) Developmental Gerstmann's syndrome: A distinct clinical entity of learning disabilities. *Pediatric Neurology*, 22: 267–278.
- Tang Y, Zhang W, Chen K, Feng S, Ji Y, Shen J, Reiman E.M, Liu Y (2006) Arithmetic processing in the brain shaped by cultures. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 103: 10775–10780.

Verguts T, FiasW, Stevens M (2005) A model of exact small number representation. *Psychonomic Bulletin and Review*, 12: 66–80.

Zorzi M, Butterworth B (1999) A computational model of number comparison. In: Hahn M, Stoness S.C (Eds.). *Proceedings of the twenty-first annual conference of the cognitive science society*. Mahwah, NJ, Erlbaum: 778–783.

Liste des annexes

Liste des annexes :

Annexe n°1 : Formulaire de consentement de participation.

**Annexe n°2 : Première épreuve du protocole arithmétique
Shalev**